

MAPOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ V BIOLOGICKÝCH TKÁNÍCH

ELECTROMAGNETIC FIELD MAPPING IN BIOLOGICAL TISSUES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

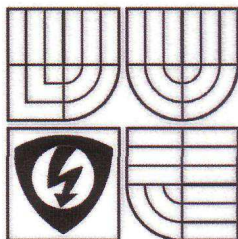
MARTIN BEREZNANIN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ROZMAN, CSc.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Berežnanin Martin

Ročník: 3

ID: 74888

Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Mapování elektromagnetických polí v biologických tkáních

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vypracujte modelovou studii šíření velmi krátkých vln v biologických tkáních. Pro stanovení spektrálního absorbovaného výkonu (SAR) v modelovém prostředí využijte platnou hygienickou normu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Rozman, J.: Terapeutická technika. Skriptum FEI VUT, Brno, 2000
- [2] Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením č. 480/2000 Sb.

Termín zadání: 1.2.2008

Termín odevzdání: 2.6.2008

Vedoucí projektu: doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Martin Bereznanin
Bytem: Stará Rudná 190, Rudná pod Pradědem
Narozen/a (datum a místo): 18.5.1986, Bruntál

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Mapování elektromagnetických polí v biologických tkáních

Vedoucí/školicitel VŠKP: doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

Ústav: Ústav biomedicínského inženýrství

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt

Hlavním cílem této studie je seznámit se s teorií elektromagnetického pole a vytvořit modelovou studii šíření velmi krátkých vln v biologických tkáních. Dalším bodem této práce je zjistit velikost měrného absorbovaného výkonu (SAR) za využití platné hygienické normy.

Konkrétní modelové řešení bylo realizováno v modelovém prostředí programu Comsol Multiphysics 3.4a. V tomto modelovém prostředí se nám podařilo vymodelovat lidskou hlavu a mobilní telefon s interní anténou. Na základě zadání patřičných parametrů se nám podařilo znázornit rozložení intenzity elektrického pole a následně vypočítat přijatý měrný absorbovaný výkon. Stejně tak jsme byli schopni určit teplotní změny biologické tkáně pro interval šesti minut specifikovaný platnou hygienickou normou.

Klíčová slova

Elektromagnetické pole, Maxwellovy rovnice, planární anténa, disperze vln, měrný absorbovaný výkon, Comsol Multiphysics.

Abstract

The main objective of this study is to learn about the theory of electromagnetic field and to create a model of propagation of ultrashort waves in a biological tissue. Next point of this paper is to determine a specific absorption rate (SAR) using a valid sanitary standard.

A particular model solution was realized in a model environment of the program Comsol Multiphysics 3.4a. In this model environment we succeeded to create a human head and a cellular phone with an intern antenna. First of all we entered appropriate parameters which led to a successful display of the distribution of electric field intensity. In the next step we were able to determine a value of specific absorption rate taken by a biological tissue. Also we determined a development of a temperature in biological tissue, according to a six minutes long interval according to a valid sanitary standard.

Keywords

Electromagnetic field, Maxwell's equations, planar antenna, wave dispersion, specific absorption rate, Comsol Multiphysics.

Bibliografická citace dle ČSN ISO 690

BEREZNANIN, M. *Mapování elektromagnetických polí v biologických tkání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

P r o h l á š e n í

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Mapování elektromagnetických polí v biologických tkáních" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Rozmanovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....
podpis autora

OBSAH

1. Úvod do problematiky.....	11
2. Poznatky z teorie elektromagnetického pole.....	12
2.1 Maxwellovy rovnice.....	12
2.2 Řešení Maxwellových rovnic.....	13
2.3 Rovinné vlny harmonické v dielektriku.....	14
2.4 Disperze vln.....	14
2.5 Pole kmitajícího dipólu.....	15
2.6 Odraz a lom vlnění na rozhraní.....	16
2.7 Odraz a lom mezi dvěma dielektriky.....	18
3. Hygienická norma.....	20
3.1 Nařízení vlády č. 480/2000 Sb. o ochraně před neionizujícím zářením.....	20
3.2 Nejvyšší přípustné hodnoty.....	20
3.3 Měrný absorbovaný výkon (SAR).....	22
3.4 Fyziologické účinky elektromagnetických polí.....	23
4. Antény mobilních telefonů.....	25
4.1 Historický vývoj typů antén.....	25
4.2 Vyzařovací diagramy jednotlivých apertur.....	25
4.3 Planární antény.....	26
4.4 Parametry antén mobilních telefonů.....	32
5. Programové prostředí.....	35
5.1 Program COMSOL Multiphysics™ 3.4a.....	35
5.2 RF modul.....	36
5.3 Konkrétní modelové řešení.....	37
5.4 Návrh modelu.....	38
5.5 Nastavení parametrů modelu.....	39
5.6 Grafické řešení.....	41
5.7 Výpočet hodnoty SAR.....	44
6. Závěr.....	47
7. Literatura.....	49
8. Seznam obrázků a tabulek.....	50
9. Seznam použitých zkratk a symbolů.....	51
10. Obsah přiloženého CD.....	52

1. Úvod do problematiky

Na začátku 21. století jsme svědky nevídaného nárůstu umělých zdrojů elektromagnetického pole (EMP) v souvislosti s bouřlivým rozvojem informačních bezdrátových technologií. Dnes se dokonce hovoří o "bezdrátové revoluci", která činí náš život pohodlnější, ale má i svá negativa. V konečném důsledku je každý vystaven expozici elektromagnetickému poli jak doma, tak i v zaměstnání. A to stejnosměrným elektrickým a magnetickým polem, střídavým nízkofrekvenčním elektrickým a magnetickým polem a vysokofrekvenčním polem, kterým se budeme podrobněji zabývat.

V této studii se nejprve seznámíme se zásadními poznatky z teorie elektromagnetického pole. Tyto nám pomohou k lepšímu porozumění problematiky. Dále zde rozebereme hygienickou normu vztahující se k ochraně před neionizujícím zářením společně s jeho účinky na lidský organismus. Bude také zapotřebí prostudovat problematiku vyzařování antén, jejich vyzařovacích diagramů a to především ve frekvenčním rozsahu 0.9 - 1.8 GHz (pracovní frekvence mobilních telefonů). Všechny tyto informace využijeme v konkrétním případě, v modelovém prostředí. Tato bude dalším bodem naší práce. Zde bude naším úkolem zjistit experimentální cestou jaký dopad má toto záření na lidskou tkáň.

2. Poznatky z teorie elektromagnetického pole

V této části se seznámíme s Maxwellovými rovnicemi a s jejich řešením. Dále si popíšeme chování rovinných harmonických vln v dielektriku a pole kmitajícího dipólu. Nakonec probereme disperzi vln, odraz a lom vlnění a to jak na rozhraní tak mezi dvěma dielektriky.

2.1 Maxwellovy rovnice

Existují čtyři Maxwellovy rovnice, které si popíšeme v diferenciální i integrální podobě.

a) Diferenciální tvar

Pro pole stacionární (časově neproměnné) platí:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = J_0 \quad (2.1.1.)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 \quad (2.1.2.)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_0 \quad (2.1.3.)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.1.4.)$$

Pro pole nestacionární (obecné, časově proměnné) platí:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = J_0 + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.1.5.)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1.6.)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_0 \quad (2.1.7.)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.1.8.)$$

kde: J_0 ... hustota elektrického proudu [A/m^2]

ρ_0 ... hustota elektrického náboje [C/m^3]

E ... intenzita elektrického pole [V/m]

B ... magnetická indukce [T]

D ... elektrická indukce [C/m^2]

H ... intenzita magnetického pole [A/m]

b) Integrální tvar

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = \sum I + \frac{d\psi}{dt} \quad (2.1.9.)$$

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1.10.)$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum Q \quad (2.1.11.)$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (2.1.12.)$$

kde: $\sum I$... celkový indukční nebo konvekční proud, tedy volných nábojů
procházejících křivkou C [A]

$\sum Q$... celkový volný náboj obsažený v objemu obaleném plochou S [C]

ψ ... tok intenzity elektrického pole [V.m]

Φ ... magnetický (indukční) tok [Wb]

2.2 Řešení Maxwellových rovnic

Řešení Maxwellových rovnic vede jednak ke zobecněným vlnovým rovnicím, stejně tak ke zobecněným vlnovým rovnicím nehomogenním.

a) Zobecněné vlnové rovnice:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.2.1.)$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.2.2.)$$

b) Nehomogenní zobecněné vlnové rovnice:

V tomto případě existuje \vec{J}_{vn} - například proud v anténě.

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu \frac{\partial \vec{J}_{vn}}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon} \text{grad} \rho_{vn} \quad (2.2.3.)$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu \text{rot} \vec{J}_{vn} \quad (2.2.4.)$$

kde: ϵ ... permitivita [F/m]

μ ... permeabilita [H/m]

γ ... konduktivita [S/m]

2.3 Rovinné vlny harmonické v dielektriku

Pokud přepíšeme rovnici (2.2.1.) do fázorového tvaru, tak dostaneme:

$$\frac{d^2 \bar{E}}{dz^2} + k^2 \bar{E} = 0 \quad (2.3.1.)$$

kde: $k = \alpha - j\beta$... konstanta šíření

Pro dielektrikum platí $\gamma = 0$. Dosazením získáme konstantu šíření k , která je kladná a reálná. Řešením rovnice (2.3.1.) je tedy harmonická vlna postupující kladným směrem z , která má tvar rotujícího fázoru:

$$\bar{E}e^{j\omega t} = \bar{C}e^{j(\omega t - \alpha z)} \quad (2.3.2.)$$

Vzhledem k tomu, že pravá strana rovnice (2.3.2.) neobsahuje složku β (měrný útlum), tak můžeme konstatovat, že se jedná o vlnu netlumenou. Složka α (fázová konstanta) určuje spolu s ω fázovou rychlost. Složky \bar{E} a \bar{H} jsou ve fázi.

Charakteristická impedance:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.3.3.)$$

Poznámka: Oproti vodivému prostředí, v prostředí nevodivém Z nezávisí na kmitočtu a je reálná.

2.4 Disperze vln

Uvažujeme signál, který je složen z většího počtu harmonických složek různého kmitočtu. Jejich průběh je dán útlumem a fázovou rychlostí (β a α).

Pro útlum platí:

- pro $\omega = 0$ je $\beta = 0$ - pro nízké kmitočty dochází k malému tlumení
- pro $\omega \rightarrow \infty$ je $\beta = \infty$ - pro vysoké kmitočty dochází k velkému tlumení

Pro fázovou rychlost platí:

- pro $\omega = 0$ je $v_f = 0$
- pro $\omega \rightarrow \infty$ je $v_f \rightarrow v_{f_0} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ - jedná se o maximální hodnotu fázové rychlosti

Poznámka: Při zvětšující se vodivosti se zvětšuje β a snižuje v_f .

Signál složený z monochromatických vln různých kmitočtů se při průchodu vodivým prostředím tvarově mění, zkresluje (= disperze vln). Při kmitočtech blízkých viditelnému nebo infračervenému záření dochází k disperzi i v prostředí nevodivém.

Skupinová rychlost:

Skupinová rychlost vzniká součtem více vln. Má význam míry rychlosti signálu. V nedisperzním prostředí je totožná s fázovou rychlostí, v prostředí vodivém je vyšší než rychlost fázová. Je vždy menší než $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

2.5 Pole kmitajícího dipólu

Zde si popíšeme pole kmitajícího dipólu. Nejprve se budeme zabývat elektrickým dipólem, posléze dipólem magnetickým.

a) Kmitající elektrický dipól

Magnetický vektor:

$$\vec{H} = \frac{e}{4\pi} \left(\frac{j\alpha}{r^2} - \frac{\alpha^2}{r} \right) e^{-j\alpha r} \vec{p} \times \vec{r}_0 \quad (2.5.1.)$$

První člen je závislý na $\frac{1}{r^2}$... opožděné magnetostatické pole neboli pole blízké

Druhý člen je závislý na $\frac{1}{r}$... vzniká důsledkem veličiny, jedná se o pole zářivé

Složky pole \vec{E} :

$$E_r = \frac{p \cos \delta}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{j\alpha}{r^2} \right) e^{-j\alpha r} \quad (2.5.2.)$$

$$E_\delta = \frac{p \sin \delta}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{j\alpha}{r^2} - \frac{\alpha^2}{r} \right) e^{-j\alpha r} \quad (2.5.3.)$$

$\frac{1}{r^3}$... má význam opožděného statického pole, $\frac{1}{r^2}$... indukční(víry), $\frac{1}{r}$... zářivá část

Celkový vyzařovaný výkon:

$$P = \oint_S N_{rs} dS = \frac{\pi}{3} Z \left(\frac{aI_m}{\lambda} \right)^2 = 80\pi^2 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 I_{ef}^2 \quad (2.5.4.)$$

kde: N_{rs} ... přenos energie v radiálním směru

b) Kmitající magnetický dipól

Vektor pole \vec{E} :

$$\vec{E} = -\frac{j\omega\mu_0 e^{-j\alpha r}}{4\pi} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{j\alpha}{r} \right) \vec{m} \times \vec{r}_0 \quad (2.5.5.)$$

Složky pole \vec{H} :

$$H_r = \frac{m \cos \delta}{2\pi} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{j\alpha}{r^2} \right) e^{-j\alpha r} \quad (2.5.6.)$$

$$H_\delta = \frac{m \sin \delta}{4\pi} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{j\alpha}{r^2} - \frac{\alpha^2}{r} \right) e^{-j\alpha r} \quad (2.5.7.)$$

Celkový vyzařovaný činný výkon:

$$P = \oint_S N_{rs} dS = Z \frac{\pi}{6} I_{ef}^2 \left(\frac{2\pi r_1}{\lambda} \right)^4 = R_Z I_{ef}^2 \quad (2.5.8.)$$

2.6 Odraz a lom vlnění na rozhraní

V této části se seznámíme s odrazem a lomem vlnění na rozhraní. V prvním případě půjde o situaci, kdy je vektor \vec{E}_0 kolmý k rovině dopadu. V případě druhém se bude jednat o vektor \vec{E}_0 , který bude rovnoběžný s rovinou dopadu.

Úhly odrazu a lomu

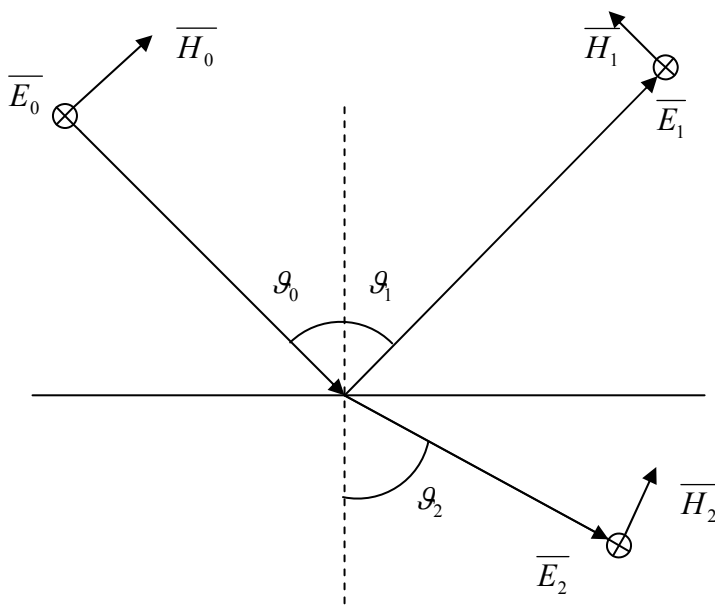
Odražená vlna: $\sin \vartheta_0 = \sin \vartheta_1 \quad (2.6.1.)$

Postupující vlna: $k_1 \sin \vartheta_1 = k_2 \sin \vartheta_2 \quad (2.6.2.)$

Snellův zákon: $\frac{\sin \vartheta_2}{\sin \vartheta_1} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{\mu_1 Z_2}{\mu_2 Z_1} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (2.6.3.)$

Amplitudy vektorů

a) Vektor \vec{E}_0 je kolmý k rovině dopadu a rovnoběžný s rovinou rozhraní:



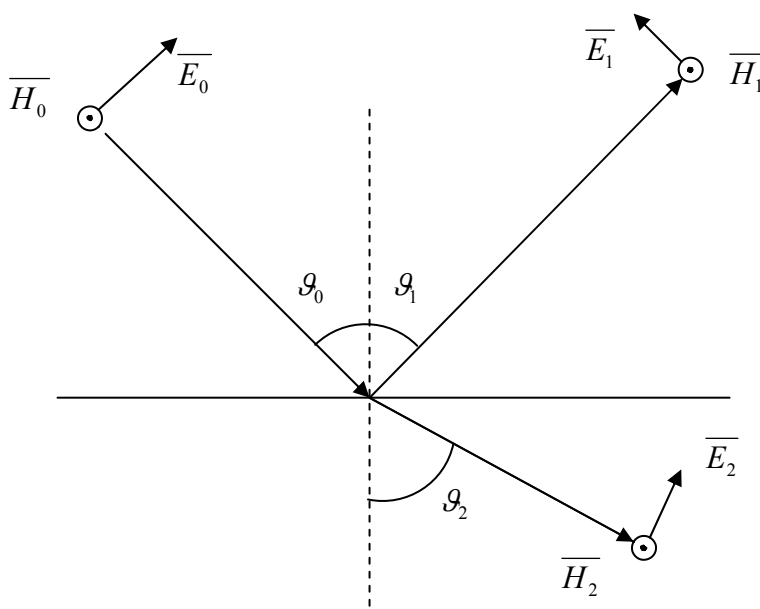
Obrázek 2.6.1: Odraz a lom vlnění - Vektor \vec{E}_0 kolmý k rovině dopadu.

Fresnelovy rovnice:

$$\vec{E}_1 = \frac{Z_2 \cos \vartheta_1 - Z_1 \cos \vartheta_2}{Z_2 \cos \vartheta_1 + Z_1 \cos \vartheta_2} \vec{E}_0 \quad (2.6.4.)$$

$$\vec{E}_2 = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_1}{Z_2 \cos \vartheta_1 + Z_1 \cos \vartheta_2} \vec{E}_0 \quad (2.6.5.)$$

b) Vektor \vec{E}_0 je rovnoběžný s rovinou dopadu:



Obrázek 2.6.2: Odraz a lom vlnění - Vektor \vec{E}_0 rovnoběžný s rovinou dopadu.

Fresnelovy rovnice:

$$\vec{H}_1 = \frac{Z_1 \cos \vartheta_1 - Z_2 \cos \vartheta_2}{Z_1 \cos \vartheta_1 + Z_2 \cos \vartheta_2} \vec{H}_0 \quad (2.6.6.)$$

$$\vec{H}_2 = \frac{2Z_1 \cos \vartheta_1}{Z_1 \cos \vartheta_1 + Z_2 \cos \vartheta_2} \vec{H}_0 \quad (2.6.7.)$$

2.7 Odraz a lom mezi dvěma dielektriky

Zde bude naším cílem popsat lom mezi dvěma dielektriky a to opět pro dva případy. Nejprve budeme uvažovat vektor \vec{E}_0 kolmý k rovině dopadu. Poté bude následovat situace, kdy bude vektor \vec{E}_0 rovnoběžný s rovinou dopadu.

a) Vektor \vec{E}_0 je kolmý k rovině dopadu:

$$\vec{E}_1 = \frac{\sin(\vartheta_2 - \vartheta_1)}{\sin(\vartheta_2 + \vartheta_1)} \vec{E}_0 \quad (2.7.1.)$$

$$\vec{E}_2 = \frac{2 \cos \vartheta_1 \sin \vartheta_2}{\sin(\vartheta_2 + \vartheta_1)} \vec{E}_0 \quad (2.7.2.)$$

b)Vektor \overline{E}_0 je rovnoběžný s rovinou dopadu:

$$\overline{H}_1 = \frac{\sin \vartheta_1 \cos \vartheta_1 - \sin \vartheta_2 \cos \vartheta_2}{\sin \vartheta_1 \cos \vartheta_1 + \sin \vartheta_2 \cos \vartheta_2} \overline{H}_0 \quad (2.7.3.)$$

$$\overline{H}_2 = \frac{2 \sin \vartheta_1 \cos \vartheta_1}{\sin \vartheta_1 \cos \vartheta_1 + \sin \vartheta_2 \cos \vartheta_2} \overline{H}_0 \quad (2.7.4.)$$

Koeficienty mezi fázory jsou reálné, tudíž odražená i pronikající vlna jsou ve fázi s vlnou dopadající.

Podmínka pro úplný odraz: $\sin \vartheta_2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sin \vartheta_1 = a > 1 \quad (2.7.5.)$

3. Hygienická norma

V této kapitole se blíže seznámíme s nařízením vlády č. 480/2000 Sb. o ochraně před neionizujícím zářením a s ním spojenými nejvyššími přípustnými hodnotami SAR (Specific absorption rate). Dále zjistíme, jak spočítat hodnotu SAR pro konkrétním případ. Nakonec popíšeme fyziologické účinky elektromagnetických polí na biologické tkáně.

3.1 Nařízení vlády č. 480/2000 Sb. o ochraně před neionizujícím zářením

Podmínky ochrany zdraví osob

Expozice osob elektrickým nebo magnetickým polím a elektromagnetickým zářením s frekvencí od hodnoty 0 Hz do hodnoty $3 \cdot 10^{11}$ Hz musí být omezena tak, aby

- a) proudová hustota indukovaná v těle (dále jen "proudová hustota"),
- b) měrný v těle absorbovaný výkon, případně měrná v těle absorbovaná energie a
- c) hustota zářivého toku elektromagnetické vlny s frekvencí vyšší než 10^{10} Hz dopadající na tělo nebo na jeho část

nepřekročily nejvyšší přípustné hodnoty.

Pro účely tohoto nařízení se rozumí

- a) neionizujícím zářením elektromagnetické záření, které není schopno ionizovat atomy a molekuly, a elektrická a magnetická pole,
- b) expozicí jakákoli situace, kdy je osoba vystavena elektrickému nebo magnetickému poli, poli elektromagnetické vlny nebo elektrickému proudu,
- c) nejvyššími přípustnými hodnotami hodnoty veličin, které bezprostředně souvisejí s biologickými efekty a vznikají při expozici osob,
- d) referenční úrovní hodnoty přímo měřitelných veličin, pomocí nichž se zjišťuje, zda u osoby vystavené expozici nemohou být překročeny nejvyšší přípustné hodnoty, [4].

3.2 Nejvyšší přípustné hodnoty

Nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu (SAR) a měrné absorbované energie (SA) jsou stanoveny v tabulce č. 1. Tyto nejvyšší přípustné hodnoty se vztahují na celkovou absorpci všech přítomných složek elektromagnetického pole v tkáních těla v intervalu frekvencí od hodnoty 100kHz do hodnoty 10GHz.

Tabulka č. 1: Nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu a energie

Měrný absorbovaný výkon (SAR) a měrná absorbovaná energie (SA) - nejvyšší přípustné hodnoty				
Platí pro frekvence od 100000 Hz do 10 ¹⁰ Hz	Měrný absorbovaný výkon - SAR - středovaný pro kterýkoliv šestiminutový interval a celé tělo	SAR středovaný pro kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g* tkáně s výjimkou rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	SAR středovaný pro kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g* tkáně rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	Špičková hodnota měrné absorbované energie SA středované pro kterýchkoli 10 g* tkáně
zaměstnanci	0,4 W/kg	10 W/kg	20 W/kg	0,01 J/kg**
ostatní osoby	0,08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg	0,002 J/kg**

* Těchto 10 g je třeba volit ve tvaru krychle, nikoli jako plochý útvar na povrchu těla.

** Platí pro pulsy kratší než 30 μ s při frekvenci 300MHz až 10GHz

Doba středování pro měrný absorbovaný výkon je šest minut. Při krátkodobé expozici (kratší než šest minut) není tedy nejvyšší přípustná hodnota měrného absorbovaného výkonu překročena, je-li pro zaměstnance splněna nerovnost

$$\sum_i (SAR_i \cdot t_i) \leq 2,4 W \cdot \min \cdot kg^{-1} \quad (3.2.1)$$

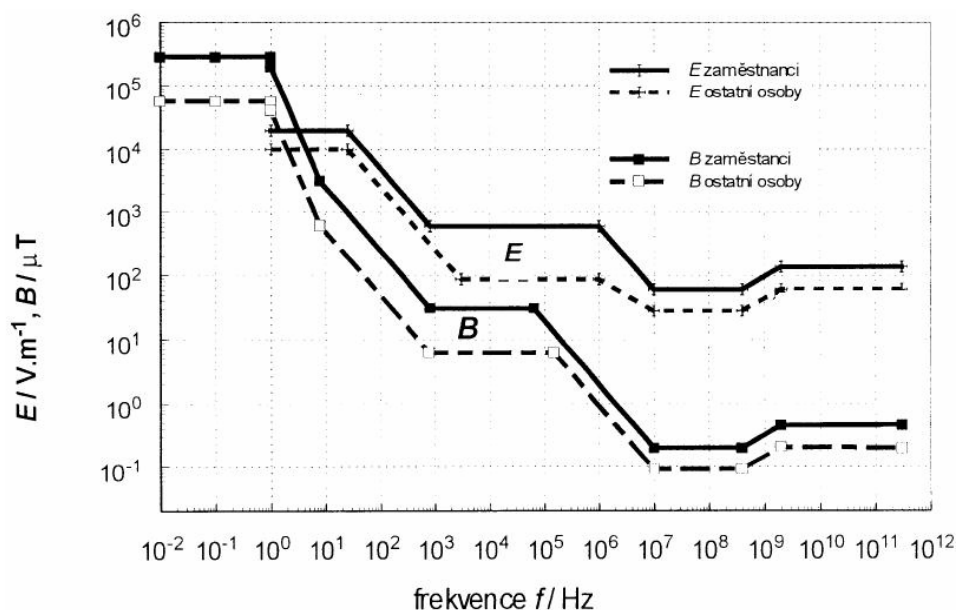
a pro ostatní osoby nerovnost

$$\sum_i (SAR_i \cdot t_i) \leq 0,48 W \cdot \min \cdot kg^{-1} \quad (3.2.2)$$

SAR_i je měrný absorbovaný výkon při i-té expozici ve $W \cdot kg^{-1}$ a t_i je doba trvání i-té expozice v minutách.

K určení tepelného působení zdrojů s různými frekvencemi, které se uplatňuje při frekvencích vyšších než 100 kHz, je nutné vypočítat celkový měrný absorbovaný výkon sečtením příspěvků SAR_i od zdrojů s frekvencemi z intervalu od 100 kHz do 10 GHz a celkovou hustotu zářivého toku sečtením příspěvků S_j od zdrojů s frekvencemi z intervalu od $f > 10$ GHz do 300 GHz. Nejvyšší přípustná hodnota není překročena, je-li součet poměru celkového měrného absorbovaného výkonu k jeho nejvyšší přípustné hodnotě SAR_L a poměru celkové hustoty zářivého toku k její nejvyšší přípustné hodnotě S_L menší než jedna nebo roven jedné, [4]:

$$\sum_{100kHz}^{10GHz} SAR_i / SAR_L + \sum_{f>10GHz}^{300GHz} S_j / S_L \leq 1 \quad (3.2.3)$$



Obrázek 3.3.1: Referenční úrovně - Elektrické pole E a magnetická indukce B, [4]

3.3 Měrný absorbovaný výkon (SAR)

Jedná se o časovou derivaci podílu diferenciálního množství energie dW a diferenciálního množství látky dm obsažené v objemovém elementu dV s hustotou látky ρ :

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dW}{dV} \right) \quad (3.3.1)$$

Měrný absorbovaný výkon (SAR) je možné vyčíslit podle těchto rovnocenných vzorců, [4]:

$$SAR = \frac{\sigma E_i^2}{\rho} \quad (3.3.2)$$

$$SAR = c_i \frac{dT}{dt} \quad (3.3.3)$$

$$SAR = \frac{J^2}{\rho \sigma} \quad (3.3.4)$$

Jednotlivé symboly označují:

E_i ... intenzitu elektrického pole uvnitř tělesné tkáně [V/m]

σ ... elektrickou vodivost tkáně těla [S/m]

c_i ... měrnou tepelnou kapacitu tělesné tkáně [J/(kg·°C)]

$\frac{dT}{dt}$... časovou derivaci teploty v tělesné tkáni [°C/s]

J ... indukovanou proudovou hustotu v tělesné tkáni [A/m²]

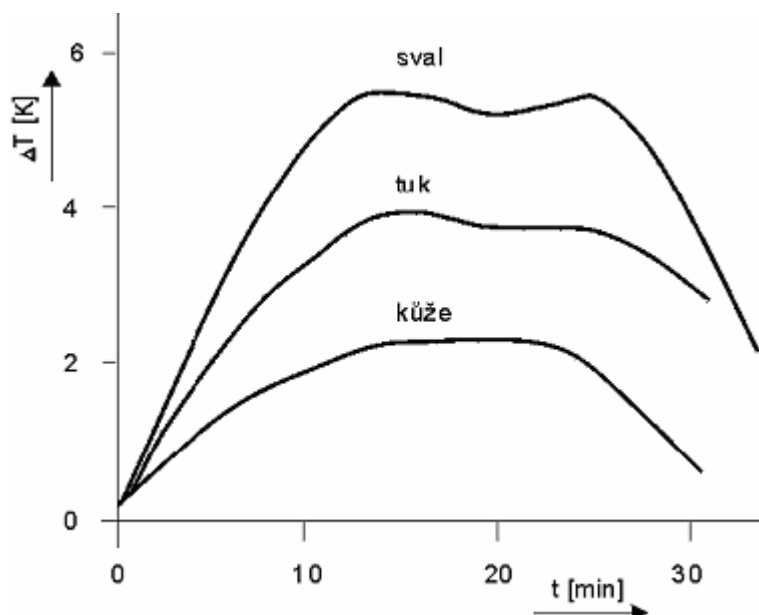
SAR ... měrný absorbovaný výkon [W/kg]

SA ... měrná absorbovaná energie [J/kg]

3.4 Fyziologické účinky elektromagnetických polí

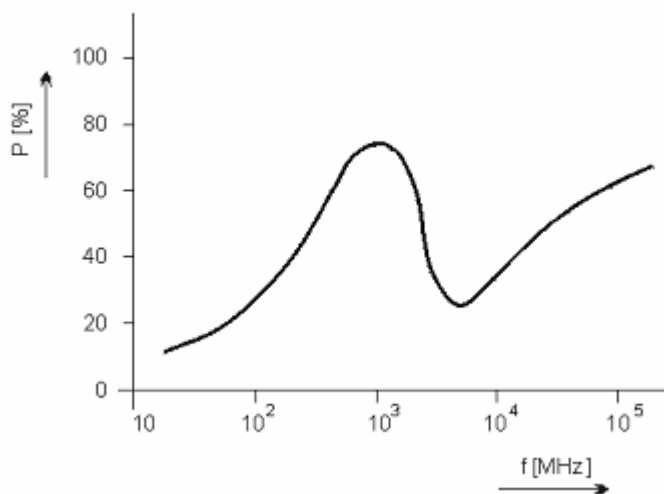
Tepelné účinky

Tepelné účinky elektromagnetických polí, které se projevují objektivně indikovatelným zvýšením teploty ozařovaných tkání, jsou závislé na velikosti pohlcené energie a na hloubce, ve které se záření absorbuje. Čím vyšší je užitá pracovní frekvence, tím menší je hloubka vniku vlnění do tkání organismu. Výsledný tepelný efekt je závislý na rozměrech a tvaru biologických struktur, na možnostech jejich ochlazování protékající krví či odvodu tepla z povrchu těla (evaporací). Zásadní význam zde proto má termoregulační mechanismus organismu. Průběh změn teploty typických tkání při ozáření elektromagnetickým polem dokumentující adaptační schopnost organismu je uveden na **Obrázku 3.3.2.**, [2].



Obrázek 3.3.2: Oteplení tkání v závislosti na expozici.

Při celotělových modelových studiích respektujících konstituční parametry jedinců byla zjištěna závislost absorbovaného výkonu na frekvenci. Tato závislost je uvedena na **Obrázku 3.3.3.**, [2].



Obrázek 3.3.3: Frekvenční závislost absorbovaného výkonu.

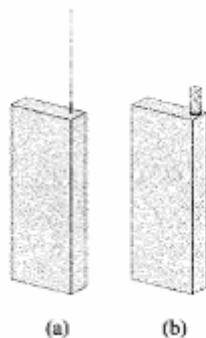
K největší absorpci výkonu tedy dochází na frekvencích blízkých frekvenci 10^3 MHz.

4. Antény mobilních telefonů

V této části bude naším úkolem seznámit se se základními parametry antén mobilních telefonů. Tyto informace následně využijeme v modelové studii. Zjistíme také, jaké vyzařovací diagramy má čtvrtvlnná a šroubovitá apertura.

4.1 Historický vývoj typů antén

Antény mobilních telefonů prošly určitým vývojem, co se týče jednotlivých typů. Ze začátku se vyráběly antény dipólové. Po těchto se přešlo ke čtvrtvlnným aperturám. Ty nakonec vystřídaly antény ve tvaru šroubovice, které se používají dodnes. V případě interních antén mobilních telefonů se využívá mikropáskové technologie, kterou se budeme zabývat také.



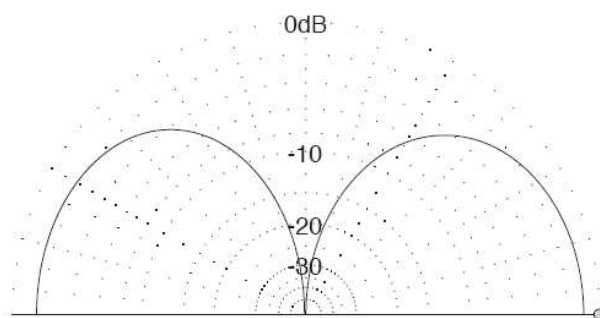
Obrázek 4.1.1: Antény mobilních telefonů: a) Čtvrtvlnný monopól, b) Šroubovice.

4.2 Vyzařovací diagramy jednotlivých apertur

Zde se seznámíme se základními tvary vyzařovacích diagramů čtvrtvlnné a šroubovitě apertury.

a) Čtvrtvlnná anténa

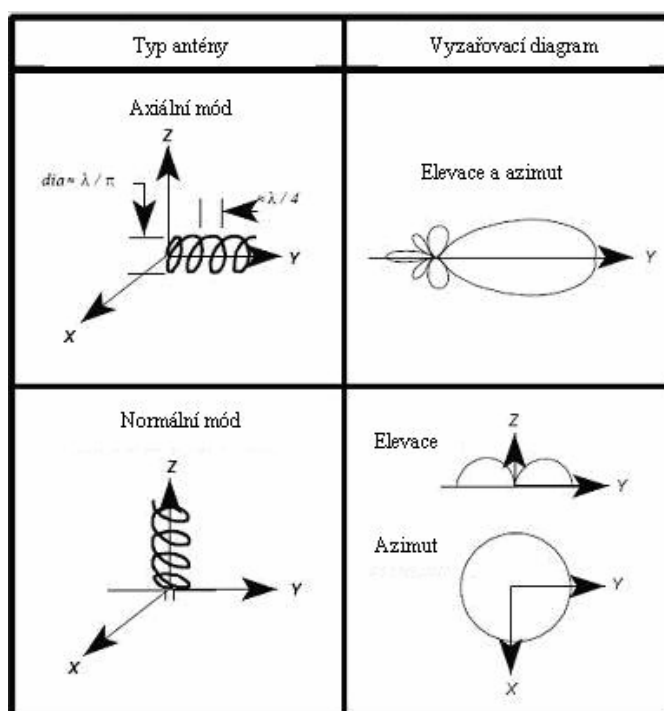
Jedná se o jednu z nejjednodušších a nejefektivnějších antén. Čtvrtvlnná anténa generuje záření, jehož vlnová délka je dvakrát větší než je délka antény, [12].



Obrázek 4.2.1: Vyzařovací diagram čtvrtvlnné antény.

b) Anténa tvaru šroubovice

Spirálovitá anténa se skládá z vodivého drátu stočeného do tvaru šroubovice. Tato apertura může pracovat ve dvou módech: V normálním (broadside) nebo osovém (endfire), [11].



Obrázek 4.2.2: Vyzařovací diagram spirálovité antény.

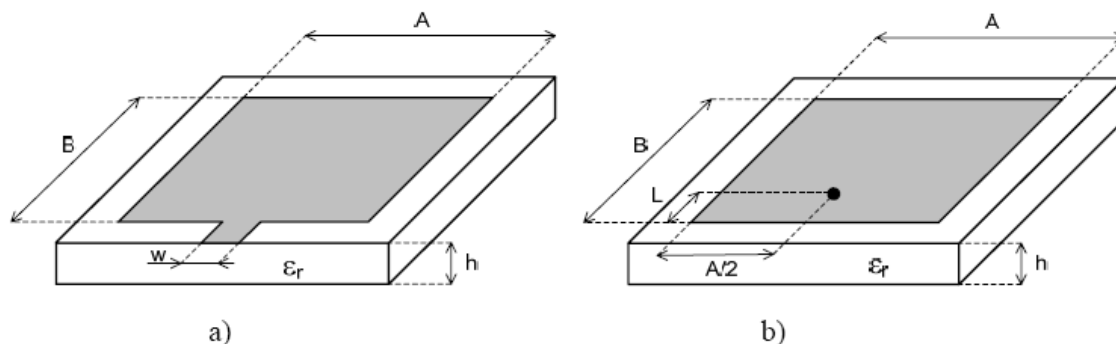
Na **Obrázcích 4.2.1 a 4.2.2** vidíme vyzařovací diagramy patřičných apertur, [12], [11].

4.3 Planární antény

Planární (nebo také mikropáskové) antény jsou velice rozšířeným druhem antén díky svým rozměrům. Navíc jsou vyráběny stejnou technologií jako tištěné spoje a tím se jejich výroba stává levnou a s možností integrace do mikrovlnných obvodů. Touto technologií však nelze vyrábět antény pro velké výkony. Další nevýhodou může být jejich úzkopásmovost, což je dáno vysokým činitelem jakosti mikropáskové struktury. Problém může představovat nežádoucí vyzařování napájecího mikropáskového vedení, deformující vyzařovací diagram a snižující účinnost antény.

Vícepásmovými planárními anténami rozumíme takové, které pracují (rezonují) na dvou a více kmitočtech (v kmitočtových pásmech). V následujících kapitolách budou uvedeny nejznámější konstrukce takových antén.

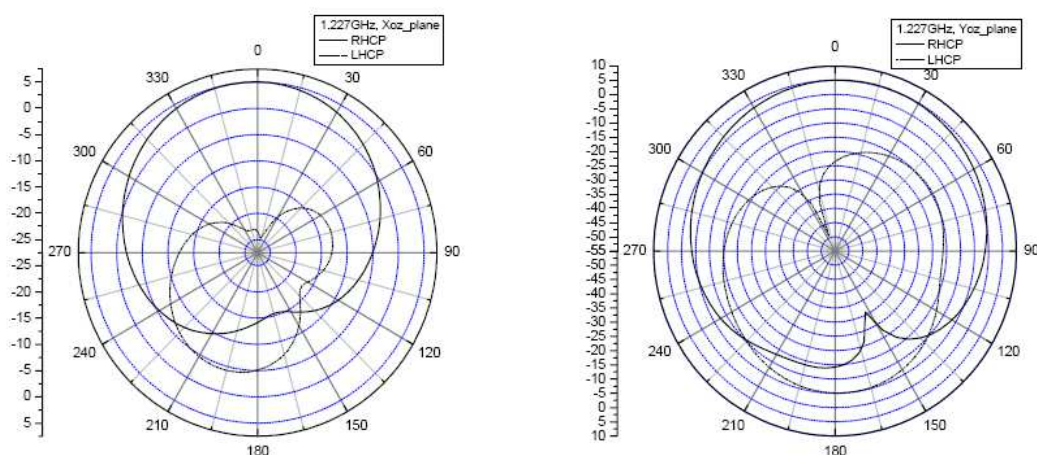
a) Flíčková anténa



Obrázek 4.3.1: Planární flíčková anténa napájena: a) mikropáskovým vedením, b) koaxiální sondou.

Nejjednodušší a nejčastěji používaná konstrukce planární antény je tzv. „patch antenna“, neboli flíčková anténa viz. **Obrázek 4.3.1**. Anténa je tvořena vodivým čtvercem, o stranách A a B s přibližnými rozměry $\lambda/2$, který je nanesený na dielektrickém substrátu tloušťky h o relativní permitivitě ϵ_r s co nejmenšími ztrátami. Druhá strana substrátu je souvisle pokovená a tvoří reflektor. Tato nese nulový potenciál a omezuje vyzařování v daném směru (na **Obrázku 4.3.1** dolů). Anténa bývá napájena mikropáskovým vedením nebo koaxiální sondou. Druhý případ má velkou výhodu ve výrazném potlačení parazitního vyzařování napájecího vedení [13].

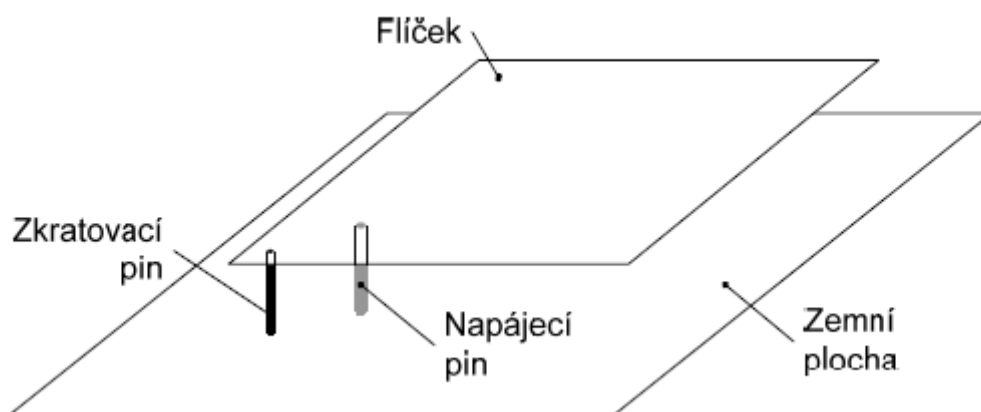
Pro získání potřebných vícepásmových vlastností se do plochy flíčku frézují štěrbiný např. ve tvaru písmene L nebo U. Tímto postupem můžeme získat více pracovních frekvencí antény [13].



Obrázek 4.3.2: Vyzařovací diagramy pro $f = 1,227 \text{ GHz}$.

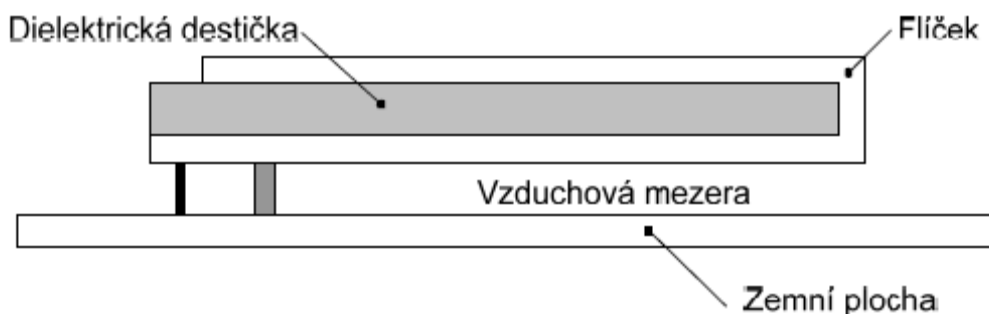
b) Planární anténa typu obrácené F

Také známá pod zkratkou PIFA (Planar Inverted-F Antenna). Skládá se z flíčku, zkratovacího pinu (nebo zkratovací stěny) a napájecího pinu (koaxiální sondy). Flíček je umístěn nad zemní plochou, ve vhodném místě je s ní propojen zkratem a napájen koaxiální sondou. Vzhled konstrukce je uveden na **Obrázku 4.3.3**. V bočním pohledu anténa připomíná písmeno F, odtud její název.

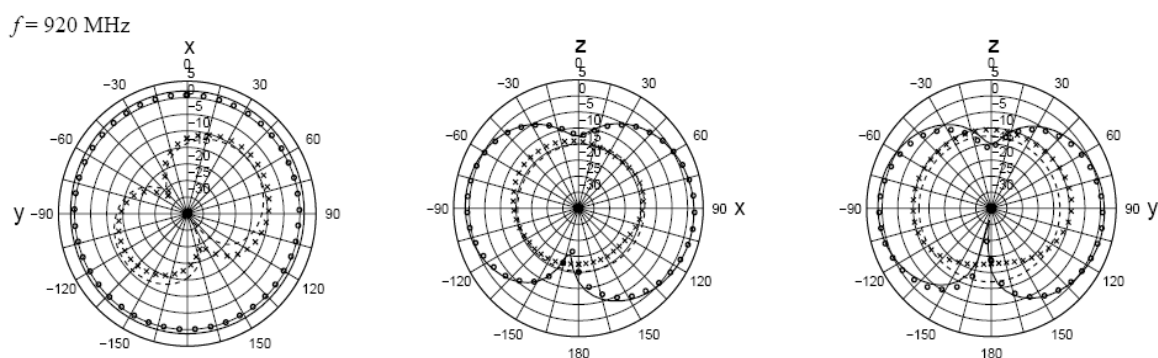


Obrázek 4.3.3: Prostorové uspořádání konstrukce PIFA.

Flíček bývá nanesen na tenký dielektrický substrát a poté upevněn nad zemní plochu. Anténa se často vyrábí jako skládaná, tedy jakoby z jediného plátu plechu, který po přeložení tvoří oboustranně pokovený flíček viz **Obrázek 4.3.4**. Pro získání potřebných vícepásmových vlastností se do plochy flíčku frézují štěrbyiny ve tvaru např. písmene L nebo U. Tímto postupem můžeme získat více pracovních frekvencí antény [13].



Obrázek 4.3.4: Prostorové uspořádání konstrukce PIFA se skládaným flíčkem.



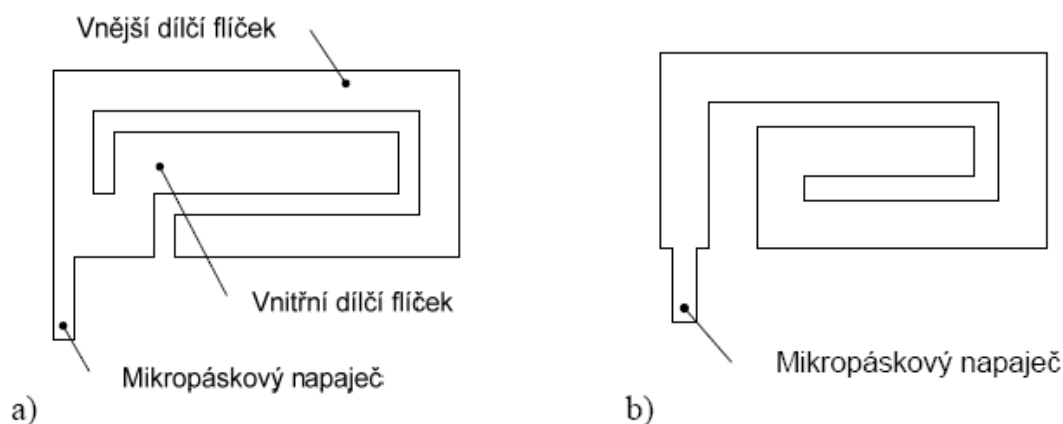
Obrázek 4.3.5: Vyzařovací diagramy pro frekvenci $f = 920 \text{ Hz}$.

c) Nízkoprofilové monopóly

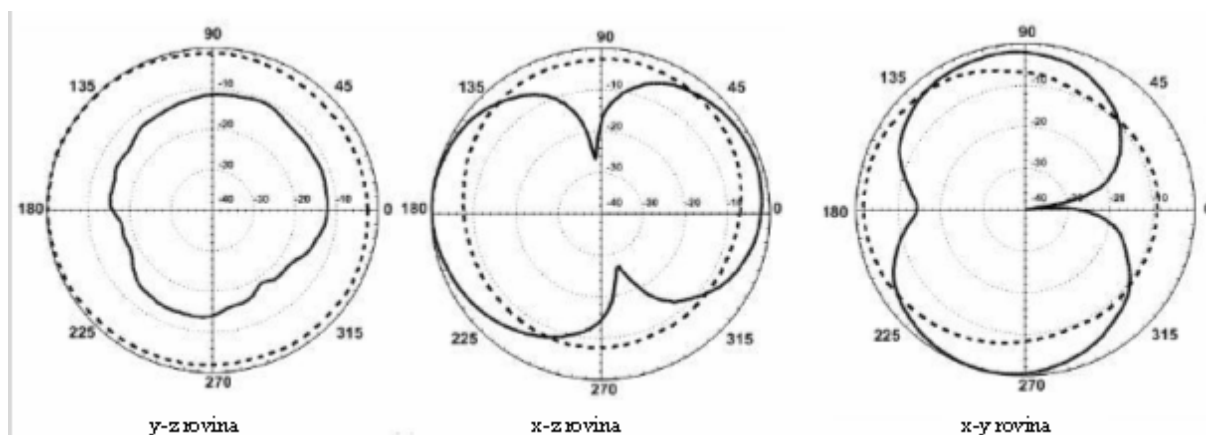
Nízkoprofilové monopóly představují klasický monopól realizovaný jako tenký kovový pásek nanesený na dielektrické podložce. Příklady dvoupásmových konstrukcí jsou uvedeny na **Obrázku 4.3.6** [13].

Všeobecně se vyskytují ve dvou provedeních:

- planární monopóly se zářezy
- planární spirálovité monopóly



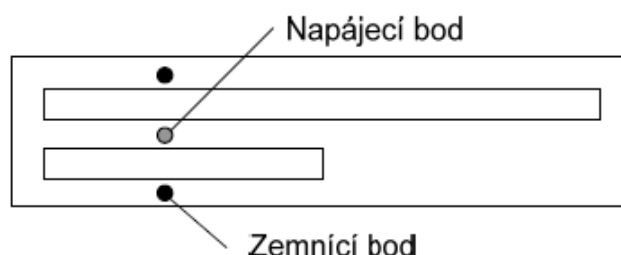
Obrázek 4.3.6: Dvoupásmové nízkoprofilové planární monopóly: a) se zářezy, b) spirální.



Obrázek 4.3.7: Vyzařovací diagramy pro frekvenci $f = 900\text{MHz}$.

d) Štěrbínové antény

Nejjednodušší anténou tohoto typu je protáhlá štěrba, vyříznuta v rozlehlé vodivé desce jak je vidět na **Obrázku 4.3.8**. Štěrba a planární dipól stejného tvaru a rozměru tvoří komplementární dvojici antén [13].



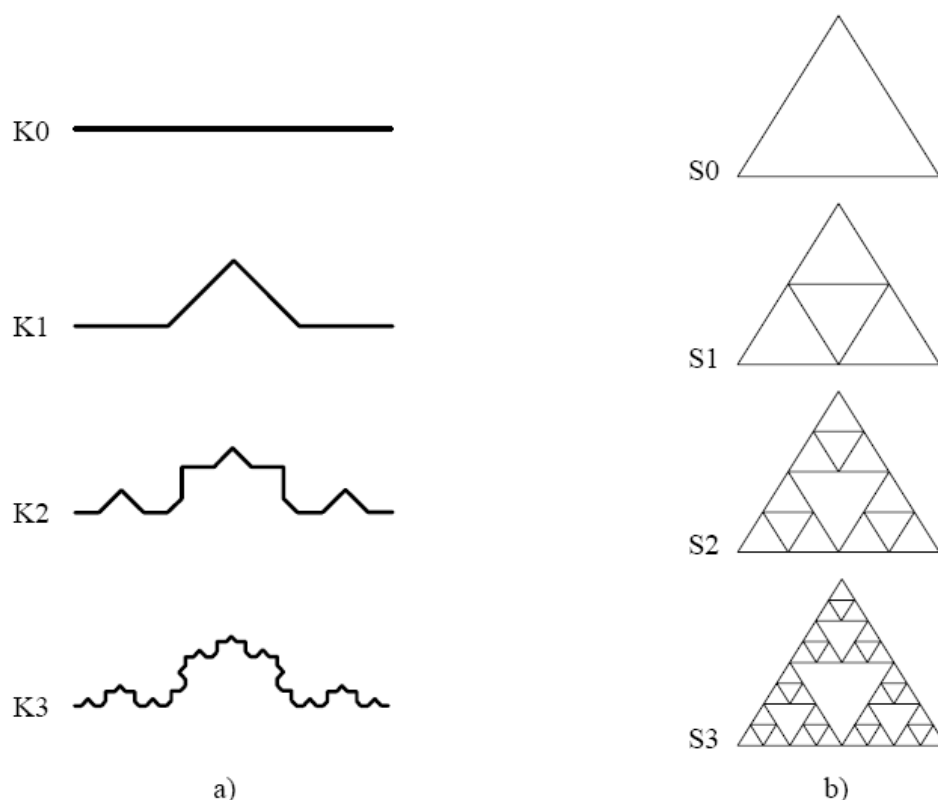
Obrázek 4.3.8: Dvoupásmová štěrbinová anténa.

e) Fraktální antény

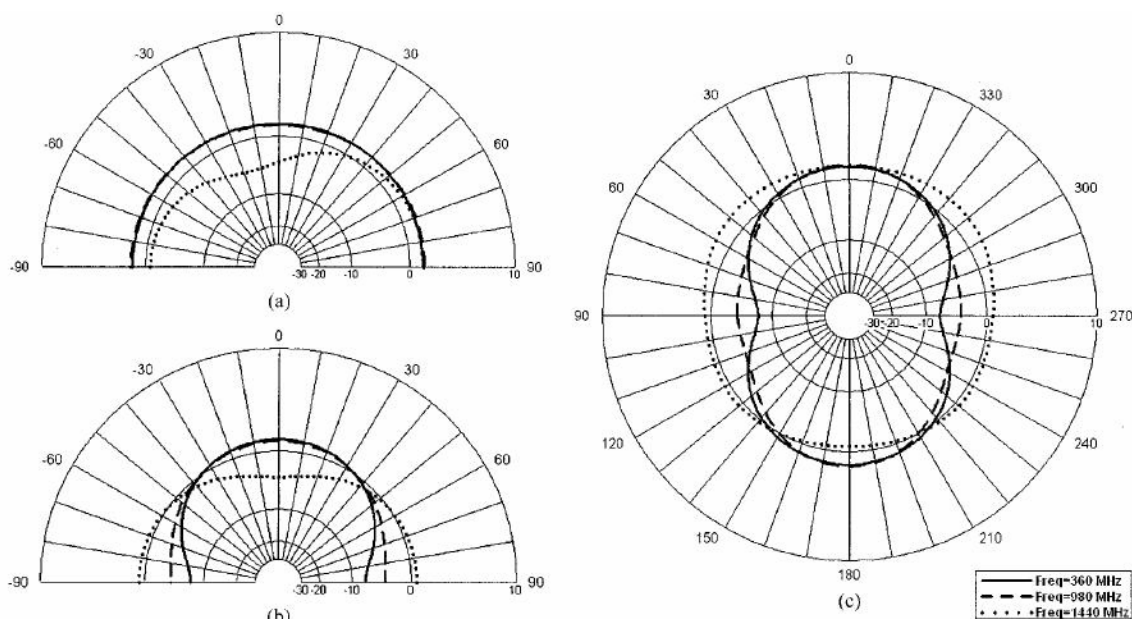
Jedná se o nový přístup ke konstrukci antén, který je výsledkem současného úsilí o spojení geometrie fraktálů s teorií elektromagnetického pole. Pojem „fraktál“, který znamená zlomkový nebo nepravidelný útvar, byl poprvé použit k popisu útvarů, kde jednotlivé části jejich struktury jsou stejné nebo podobné. A tak fraktály jsou s úspěchem používány pro modelování tak složitých přírodních útvarů jako jsou mraky, horské hřebeny, linie pobřeží, sněhové vločky, kapradí, galaxie a mnoho jiných. U fraktálů můžeme různě definovat jejich délku a skládají převážně z kopií sama sebe v různém měřítku. Tyto unikátní vlastnosti fraktálů byly využity k vývoji nové konstrukce antén, které mohou splňovat následující vysoce žádané vlastnosti:

- kompaktní rozměry,
- nízký profil,
- vícepásmovost nebo širokopásmovost.

Typickým příkladem fraktální antény je Kochův a Sierpinského monopol. V případě Kochova monopolu se jedná o křivku, tedy o Kochovu křivku. Algoritmus konstrukce Kochovy křivky, vytvářející anténu, je zřejmý z **Obrázku 4.3.9a)**. Zde jsou zobrazeny první tři iterace, označené K1 až K3, doplněné o výchozí úsečku K0, odpovídající monopolu. Obvykle je výška h takového monopolu současně také jejím maximálním vnějším rozměrem. Skutečná (elektrická) délka anténního prvku l je ovšem v našem případě funkcí počtu iterací n . Sierpinského monopol je plošný útvar. Algoritmus konstrukce Sierpinského fraktálu, vytvářející plošnou anténu, zřejmý z **Obrázek 4.3.9b)**. Zde jsou zobrazeny první tři iterace, označené S1 až S3, doplněné o výchozí útvar S0, představující rovnostranný trojúhelník. Podstata rozdílu mezi plošnou anténou Sierpinského a Kochovým monopolem je taková, že u plošné antény je nejnižší rezonanční kmitočet určen její výškou a fraktálové iterace na něj nemají vliv. Naproti tomu anténa ve tvaru fraktálové křivky se s každou iterací prodlouží a vzdor tomu, že její výška h zůstává zachována. Lze tedy očekávat, že díky jejímu fyzikálnímu prodloužení vzroste i její elektrická délka. Souvislosti s tím se přiměřeně sníží i rezonanční kmitočet. Na základě těchto vlastností je Kochův fraktál obvykle používán pro miniaturní antény a Sierpinského fraktál pro vícepásmové antény, [13].



Obrázek 4.3.9: Postup tvorby: a) Kochovy křivky, b) Sierpinského monopolu.



Obrázek 4.3.10: Vyzařovací diagramy pro frekvence $f = 360\text{MHz}$, 980MHz a 1440MHz .

4.4 Parametry antén mobilních telefonů

Rozsah výkonů těchto antén se pohybuje od 0,25 do 2Wattů. Frekvenční rozsah spadá do oblasti od 900MHz - 1,8GHz.

Tabulka č. 2: Přidělená kmitočtová pásma pro komunikační systémy, [13]

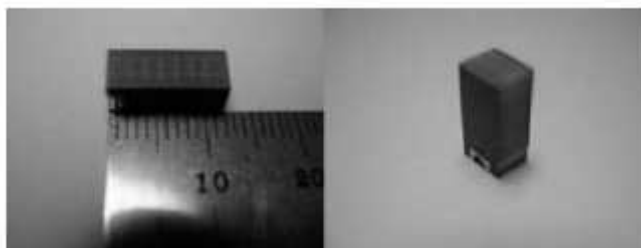
Typ sítě	Kmitočtové pásmo - vysílání	Kmitočtové pásmo - příjem
GSM900	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz
GSM1800	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz

Tabulka č. 3: Výpočet intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu

Výpočet intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu $E[\text{V/m}]$

Vzdálenost od ant.mob.tel pol. r [m]	Výkon mobilního telefonu P [W]					
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00
0,05	54,8	77,5	94,9	109,5	134,2	154,9
0,08	34,2	48,4	59,3	68,5	83,9	96,8
0,10	27,4	38,7	47,4	54,8	67,1	77,5
0,25	11,0	15,5	19,0	21,9	26,8	31,0
0,50	5,5	7,7	9,5	11,0	13,4	15,5
0,75	3,7	5,2	6,3	7,3	8,9	10,3
1,00	2,7	3,9	4,7	5,5	6,7	7,7

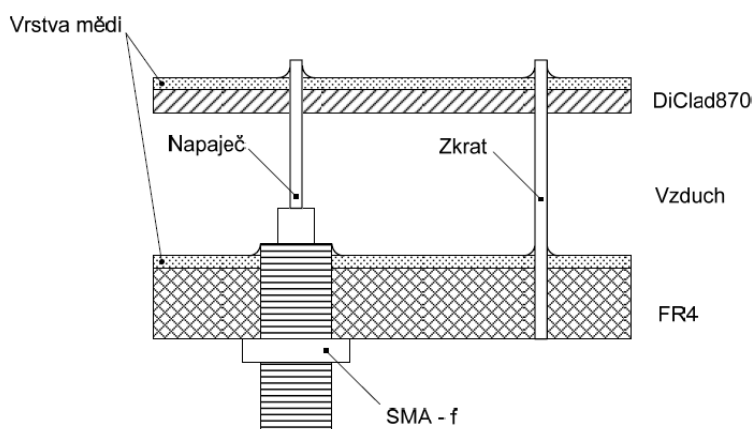
Co se týče rozměrů, antény mohou být v dnešní době již tak malé, že mohou být zabudovány přímo v mobilním telefonu. Vyrábějí se již antény o velikosti 5,8mm vysoké a 4mm široké, [8].



Obrázek 4.4.1: Chipová anténa - ukázka rozměrů.

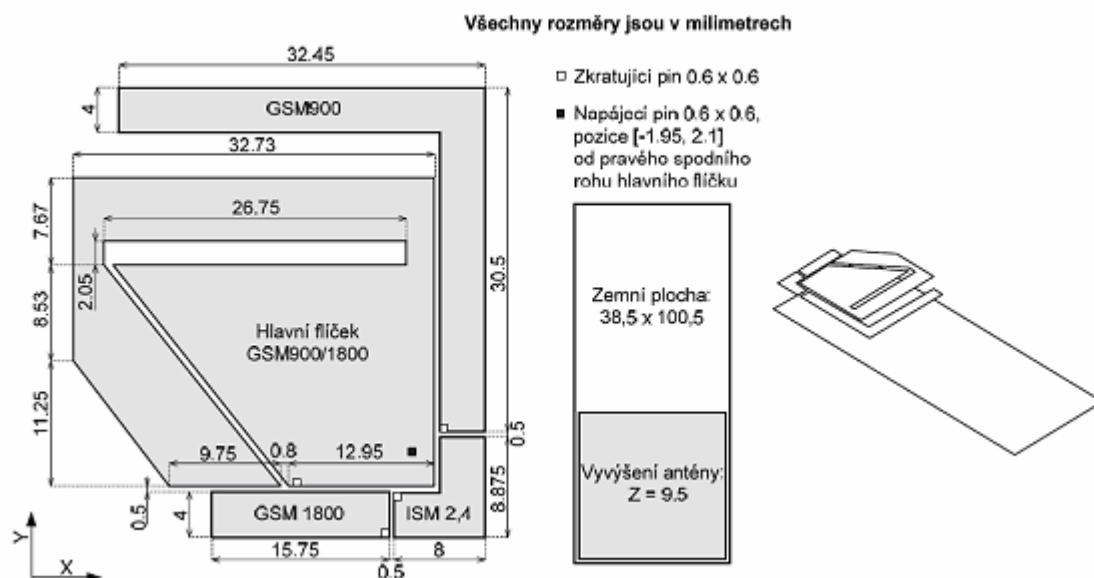
Pro modelové řešení jsem zvolil ověřenou konstrukci PIFA, která je nejvíce používanou interní anténou v komerčních aplikacích pro mobilní komunikaci. Hlavní důvod je ten, že její rozměry jsou miniaturní, což ji dělá vhodnou pro montáž do mobilních zařízení. Navíc dokáže pracovat s dvojí polarizací a tím umožňuje příjem signálu v libovolné poloze antény, což je důležitý požadavek pro všechny mobilní přijímače. Důležitý rys pro multi-band aplikace je také možnost vícepásmové realizace.

Konstrukce vychází z jednoduché flíčkové antény ve tvaru čtverce napájenou koaxiální sondou, vedeným skrz zemní plochu k hlavnímu flíčku. Anténa je zhotovena z oboustranně pokoveného substrátu o tloušťce h a relativní permitivitě ϵ_r . Pro motiv antény byl zvolen substrát s co nejnižším ϵ_r , substrát DiClad870 s $\epsilon_r = 2,33$ a tloušťkou dielektrika $h = 0,508$ mm. Zemní plocha je realizována také na vhodném substrátu, na jehož dielektrikum nejsou kladeny vysoké nároky, protože nemá na parametry antény žádný významný vliv. Jedná se o substrát FR4 s přibližnými parametry $\epsilon_r = 4,7$ a tloušťkou dielektrika $h = 1,5$ mm. Umístění a orientace jednotlivých vrstev antény jsou zobrazeny v příčném řezu strukturou na **Obrázku 4.4.2**, [13].



Obrázek 4.4.2: Příčný řez strukturou substrátů.

Finální rozměry konstrukce PIFA jsou zobrazeny na **Obrázku 4.4.3**. Ten představuje motiv, který bude zhotoven na substrát DiClad870 a fixován pomocí zkratů ve výšce $h = 9$ mm nad zemní plochou, [13].



Obrázek 4.4.3: Rozměry antény PIFA.

5. Programové prostředí

5.1 Program COMSOL Multiphysics™ 3.4a

Problematicku šíření elektromagnetických vln v biologických tkáních budeme řešit za pomoci programu Comsol Multiphysics 3.4a. Jedná se o produkt švédské společnosti COMSOL, který umožňuje modelování a simulaci fyzikálních procesů popsaných parciálními diferenciálními rovnicemi s následným řešením metodou konečných prvků. Vedle 32 a 64-bitových operačních systémů Windows a UNIX může nová verze COMSOL Multiphysics™ 3.4a pracovat pod novým operačním systémem 64-bit/32-bit Microsoft Windows Vista a pod platformou Macintosh s procesorem Intel.

Tento program má možnost zahrnout do jednoho řešení několik fyzikálních vlivů současně, například zatěžování silou při současném působení okolní teploty. Máme k dispozici srozumitelné a intuitivní grafické 2D a 3D prostředí a nejsme odkázáni na nezáživné textové údaje doplňující složité rovnice. I když je toto programové prostředí plné matematiky, může s jeho pomocí úspěšně a rychle řešit úlohy i člověk z praxe, který matematiku špičkově neovládá, ale svému oboru rozumí dobře. Grafické výstupy jsou názorným vodítkem při hledání optimálního řešení zadané úlohy. Comsol Multiphysics 3.4a pracuje společně s Matlabem, využívá jeho pracovní prostor (Workspace) a hlavně grafických funkcí, [6].

Práci v Comsol Multiphysics 3.4a můžeme rozdělit do tří etap:

1. Volba typu úlohy, vytváření geometrického modelu řešené úlohy a zadání okrajových podmínek
2. Generování sítě modelu a řešení úlohy
3. Zpracování výsledků řešení, údaje, grafy, animace

Vstupní bránou je takzvaný „Model navigátor“ - dialogové okno, ve kterém si zvolíme pracovní oblast - například přestup tepla, proudění, pružnost a pevnost, elektromagnetismus a tak dále. Touto volbou určujeme tvar parciálně diferenciálních rovnic, které bude program řešit. Zároveň tím dáváme pokyn, aby se v grafickém editoru zobrazovaly dialogy spojené s touto problematikou. Současně také volíme geometrický prostor, ve kterém budeme naši úlohu řešit. Může to být 1D, 2D a 3D. Pokud charakter naší úlohy nesplňuje žádná z už definovaných aplikací, máme možnost použít všeobecný tvar parciálně diferenciální rovnice a vhodným zadáváním koeficientů do těchto rovnic si vytváříme naši vlastní aplikaci.

Řešení úlohy:

Podle typu úlohy si program zvolí tzv. „řešič“, jehož parametry můžeme dále upravovat. Používají se následující řešiče:

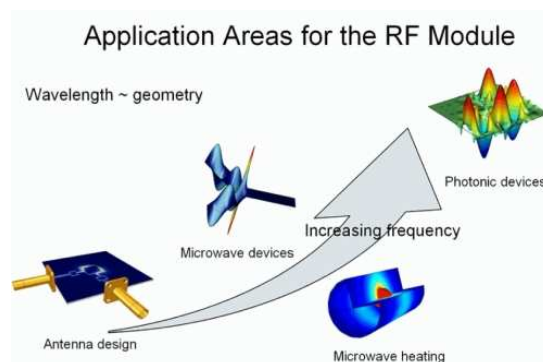
- lineární řešič,
- nelineární řešič,
- řešič na řešení úloh v proměnném čase,
- adaptivní řešič (adaptivní generování sítě se pokouší identifikovat oblasti, ve kterých je potřebná velká přesnost),
- iterační řešič,
- parametrický řešič,
- řešič multigrid, který řeší lineární nelineární úlohy parciálně diferenciální rovnice ve tvaru koeficientů nebo ve všeobecném tvaru.

Zobrazení simulace:

Proces simulace může být zobrazený v textové, ale i v grafické formě. Textová forma obsahuje hodnoty veličin (reálný čas, účinnost prvku a účinnost systému v procentech, doby reakce), které se zobrazují v jednotlivých oknech. Hodnoty veličin je možno exportovat do údajového souboru, z kterého můžeme použít údaje pro simulaci ve virtuálním prostoru.

5.2 RF modul

Pro řešení naší úlohy budeme používat jeden z modulů zabudovaných v Comsolu. Jedná se o Modul RF - radiofrekvenční modul, který umožňuje modelovat mikrovlnná zařízení a součásti z fotoniky a obecně usnadňuje návrh systémů pracujících s elektromagnetickým vlněním a to jak ve 2D, 3D, tak i v osové symetrii. Lze vytvářet prototypy zařízení, které přenášejí, přijímají nebo zpracovávají elektromagnetické vlny ve frekvenčním rozsahu od radiových až po optické vlny. Uživatel má možnost brát v úvahu multifyzikální vlivy zahrnující například interakce mezi přestupem tepla a mechanickým zatížením konstrukce. Je možné zkoumat například vliv tepla na frekvenční odezvu mikrovlnného filtru, lze zkoumat výkonové vlnovody. Modul nabízí připravené multifyzikální aplikace například pro mikrovlnné teplo. Uživatel tak nemusí složitě zkoumat, kterou aplikaci do multifyzikální úlohy zařadit.



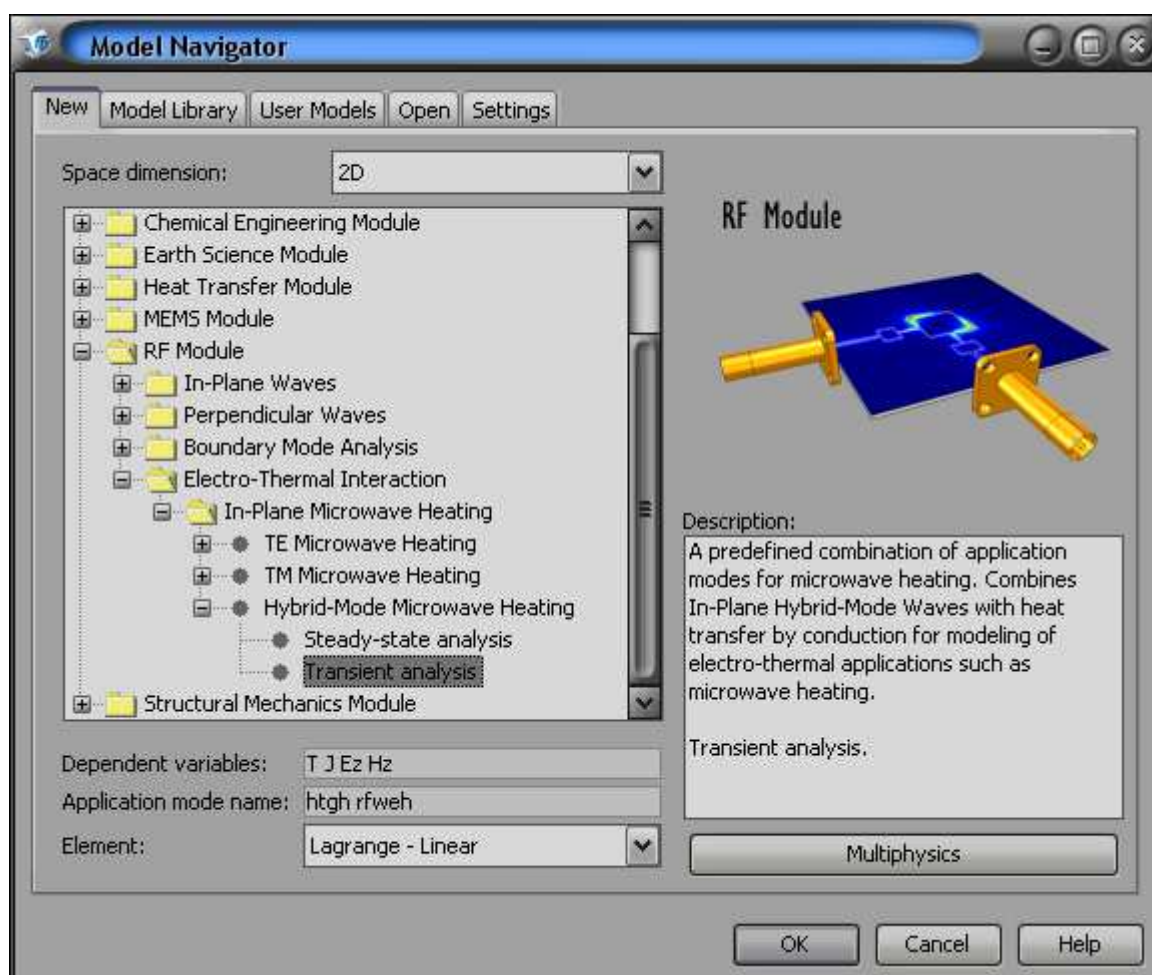
Obrázek 5.2.1: Oblasti aplikací RF Modulu.

RF modul obsahuje soubor zjednodušení založených na Maxwellových rovnicích, které jsou zjednodušeny pro konkrétní řešené případy, a předdefinované ve spojení s mikrovlnným ohřevem.

V modelovém prostředí máme možnost nastavit si vlastnosti jednotlivých rozhraní objektů, stejně tak i jejich jednotlivé parametry jako je konduktivita či relativní permitivita a permeabilita. Můžeme si také nadefinovat globální frekvenci.

5.3 Konkrétní modelové řešení

V modelovém navigátoru tedy zvolíme již zmíněný RF Modul, který se pro řešení naší úlohy hodí nejlépe. Problém budeme zkoumat ve 2D zobrazení, přičemž nás bude zajímat „elektro - tepelná interakce“ z oblasti mikrovlnného ohřevu.



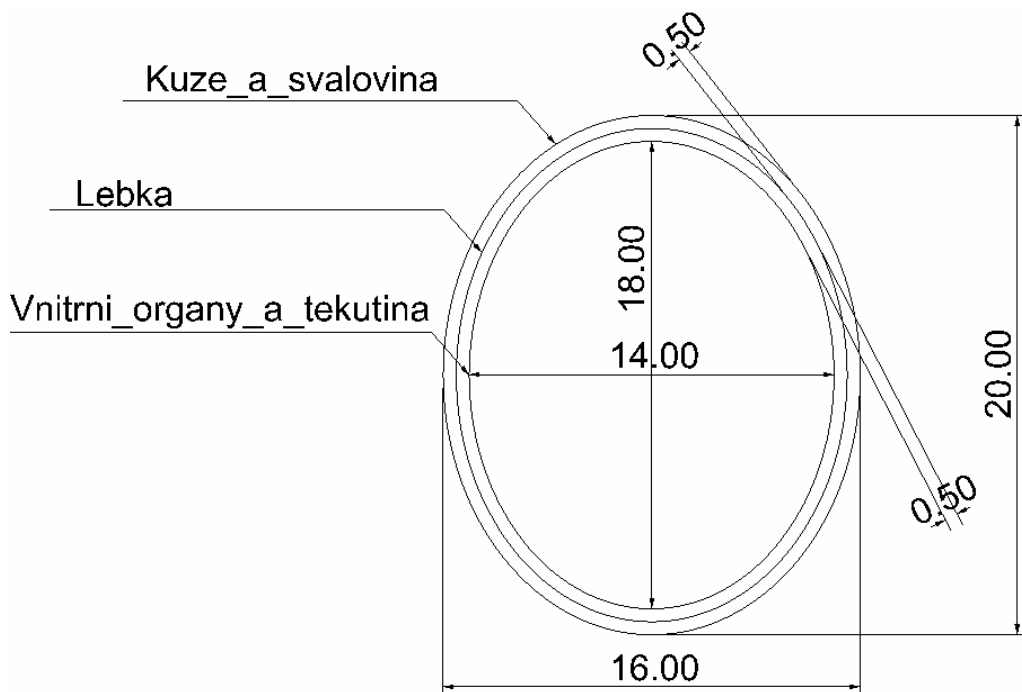
Obrázek 5.3.1: RF Modul - základní parametry.

5.4 Návrh modelu

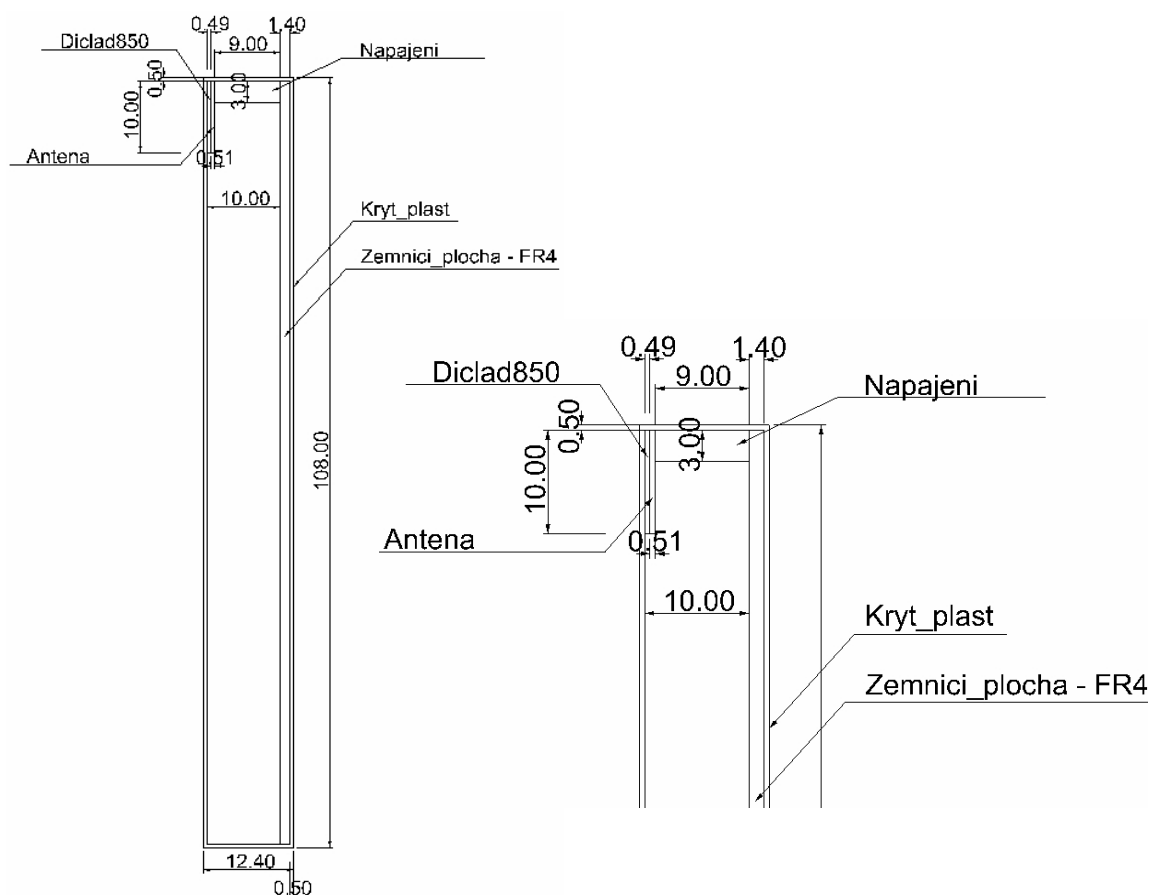
V modelovém prostředí si namodelujeme model hlavy. Lidské hlava je obecně vrstevnaté nehomogenní dielektrikum. V tomto případě budeme pro zjednodušení uvažovat tři vrstvy. Na povrchu to bude vrstva kůže a svaloviny, dále kost a uvnitř mozek s tekutinou. Vykonstruujeme tedy tři 2D elipsoidy o rozměrech 16x20cm, 15x19cm a 14x18cm. Tloušťka lebeční kosti a vrstvy kůže se svalovinou se pohybuje v rozsahu hodnot 0,44 - 0,66cm, [14]. Zde tedy uvažujeme 0,5cm pro obě vrstvy. Vrstvu kůže a svaloviny získáme tak, že označíme oba největší elipsoidy a uděláme jejich diferenci. Pro vrstvu lebeční je postup obdobný. Dále namodelujeme vnitřní elipsoid, který bude představovat vnitřní orgány a tekutinu.

Dále nakreslíme model mobilu jakožto dva obdélníky o rozměrech 12,4x108mm a 11,4x107mm, jejichž diferencí získáme vnější plastový kryt o tloušťce 0,5mm, [9]. Anténa se bude skládat ze čtyř částí - ze zemní plochy v podobě obdélníku 107x1,4mm, [13]. Na její vrchní část bude připojen obdélník o rozměrech 3x9mm, který bude reprezentovat napájení, [19]. Na konec tohoto napájení přimodelujeme anténu se substrátem Diclاد870 jakožto dva obdélníky o rozměrech 10x0,508mm a 10x0,492mm, [13]. Celý mobilní aparát umístíme ve 2D prostoru tak, aby byl ve vzdálenosti 1cm od povrchu hlavy, [9].

Všechny tyto objekty se budou nacházet v prostředí o permitivitě rovné permitivitě vzduchu tak, aby bylo umožněno šíření elektromagnetických vln.



Obrázek 5.4.1: 2D model lidské hlavy.



Obrázek 5.4.2: 2D model mobilního telefonu a detail antény.

5.5 Nastavení parametrů modelu

Parametry tkání pro modelové prostředí nastavíme podle **Tabulky č. 4**, [5]. Parametry materiálů, ze kterých je složen mobilní telefon poté nalezneme v **Tabulce č.5**, [15], [16], [17], [18].

a) Parametry jednotlivých tkání:

Tabulka č. 4: Parametry tkání pro simulaci (pro frekvenci 902.5 MHz)

Typ tkáně	Vodivost σ [S/m]	Relativní permitivita ϵ_r [-]	Hustota ρ [kg/m ³]	Specifické oteplení c_s [J/kg.K]	Tepelná vodivost k [W/m.K]
Kost	0.3406	20.7823	1810	1256	0.528
Mozek	0.9434	52.7133	1030	3710	0.528
Kůže	0.8674	41.3923	1010	3662	0.528
Sval	0.9438	55.0261	1040	3639	0.528
Krev	1.5390	61.3524	1060	3894	0.528

b) Parametry mobilního telefonu:

Tabulka č. 5: Parametry mobilního telefonu

Typ	Vodivost σ [S/m]	Relativní permitivita ϵ_r [-]	Hustota ρ [kg/m ³]	Specifické oteplení c_s [J/kg.K]	Tepelná vodivost k [W/m.K]
Plast	0	2.4	1300	1950	0.16
Diclad870	0	2.33	2230	1250	0.257
FR4	0	4.7	1900	1200	0.23

$$f = 900 \text{ MHz}$$

$$E_0 = 77,5 \text{ V/m}$$

$$P_{in} = 0.58 \text{ W}$$

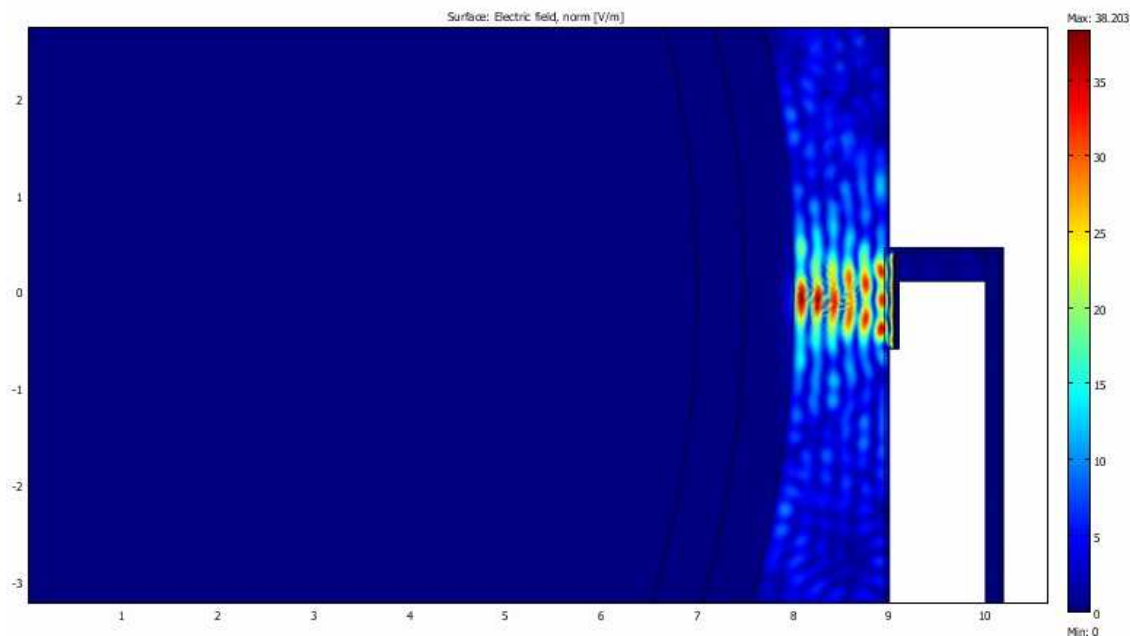
Dále je třeba nastavit tzv. „Cut-off frekvenci“ - nejnižší frekvenci, pro kterou může daný vlnovod šířit signál. Tuto nastavíme na hodnotu $nu_{c0} = 100 \text{ MHz}$, [11]. Dále nastavíme globální frekvenci vysílače na hodnotu mobilního telefonu - $nu_{rfw} = 900 \text{ MHz}$, [9].

Nyní je zapotřebí nastavit vlastnosti jednotlivých rozhraní - zejména plochy mobilu, která se dotýká hlavy. Tuto nastavíme jako takzvaný „port“ - místo, kde dochází k vyzařování. Vyzařovaný výkon nastavíme: $P_{in} = 0.58 \text{ W}$, [19]. Dále intenzitu elektrického pole $E_0 = 77,5 \text{ V/m}$, [7]. Nyní vygenerujeme síť(mesh), která bude prvního i druhého řádu (lineární a 2D objekty), neboť máme 2D objekty. Totéž nastavení provedeme pro model, v němž se bude mobilní telefon nacházet ve vzdálenosti 1 cm od hlavy. Teď nám již nezbývá než vyřešit daný model.

Postup bude následující. Nejprve vyřešíme tuto situaci z hlediska šíření elektromagnetických vln a zobrazíme rozložení intenzity elektrického pole. Toto řešení následně použijeme pro určení teplotních změn v lidské tkáni.

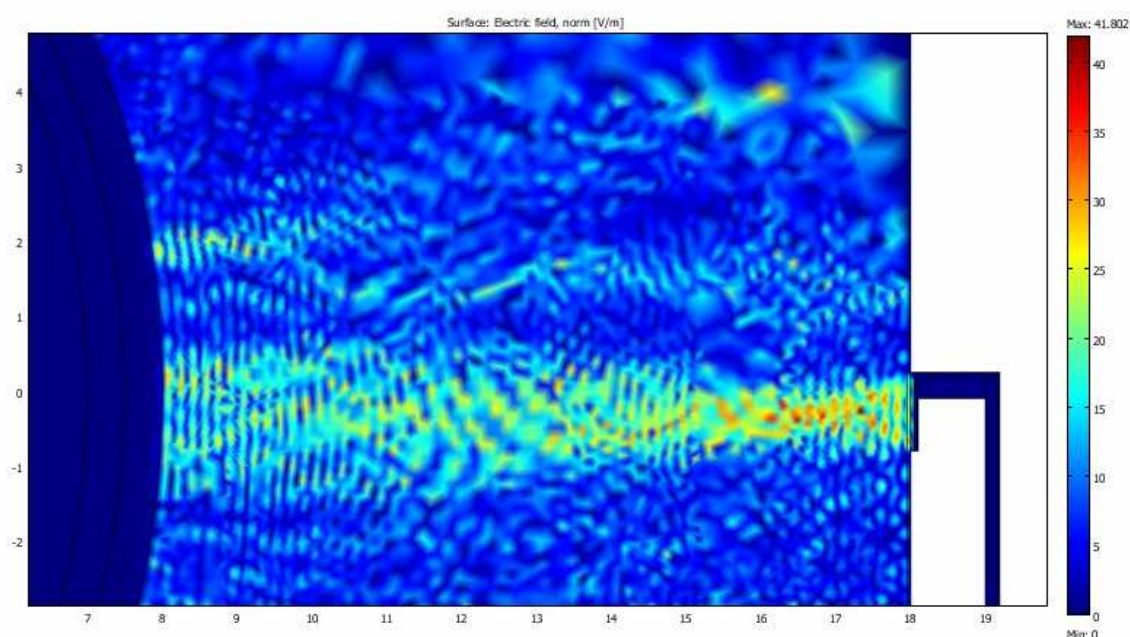
5.6 Grafické řešení

Rozložení elektrického pole:



Obrázek 5.6.1: Hodnota elektrického pole - vzdálenost 1 cm.

Pro vzdálenost 1 cm můžeme zaznamenat, že se vyskytuje jedno hlavní působíště, v němž maximální hodnota elektrického pole dosahuje 38.203 V/m . Na rozhraní prostředí - lidská tkáň dochází k útlumu, přičemž maximální hodnota elektrického pole v tkáni reprezentující kůži a svalovinu je rovna 6.876 V/m .

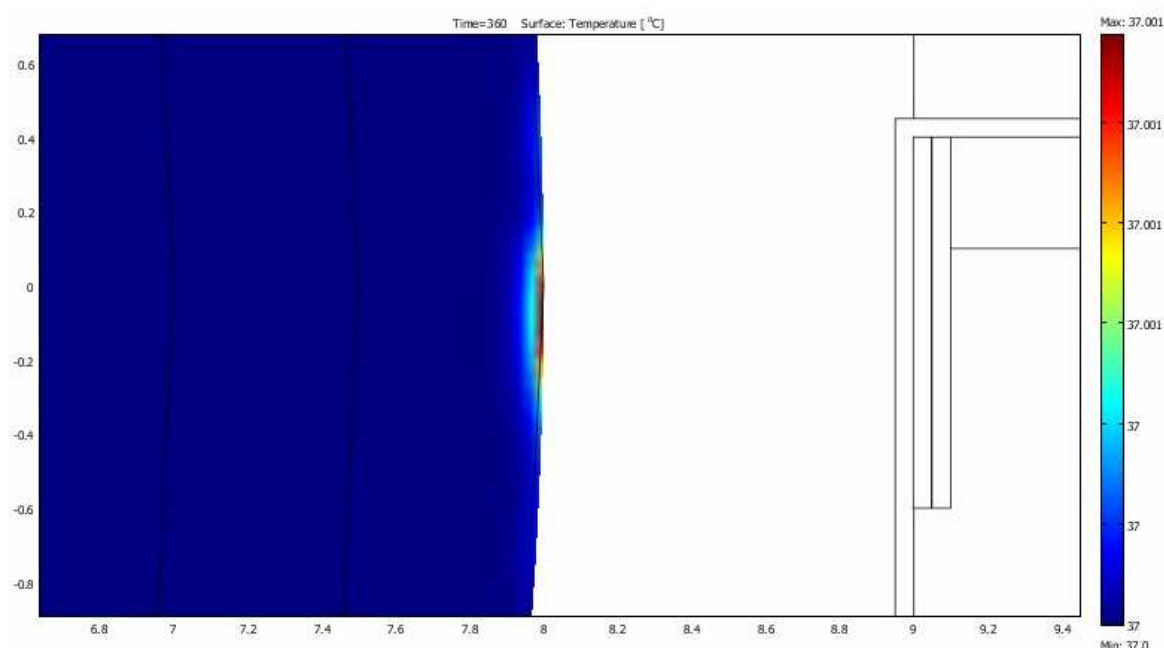


Obrázek 5.6.2: Hodnota elektrického pole - vzdálenost 10 cm.

V tomto případě dostáváme dvě hlavní ohniska, v nichž je maximální hodnota elektrického pole rovna $41.802 V/m$. Tyto ohniska se ovšem nacházejí v mnohem větší vzdálenosti od hlavy než v předchozím případě. Na rozhraní biologická tkáň - prostředí dochází opět k výraznému útlumu. Maximální hodnota elektrického pole v tkáni reprezentující kůži a svalovinu dosahuje $2.882 V/m$, tedy výrazně méně oproti vzdálenosti 1 cm.

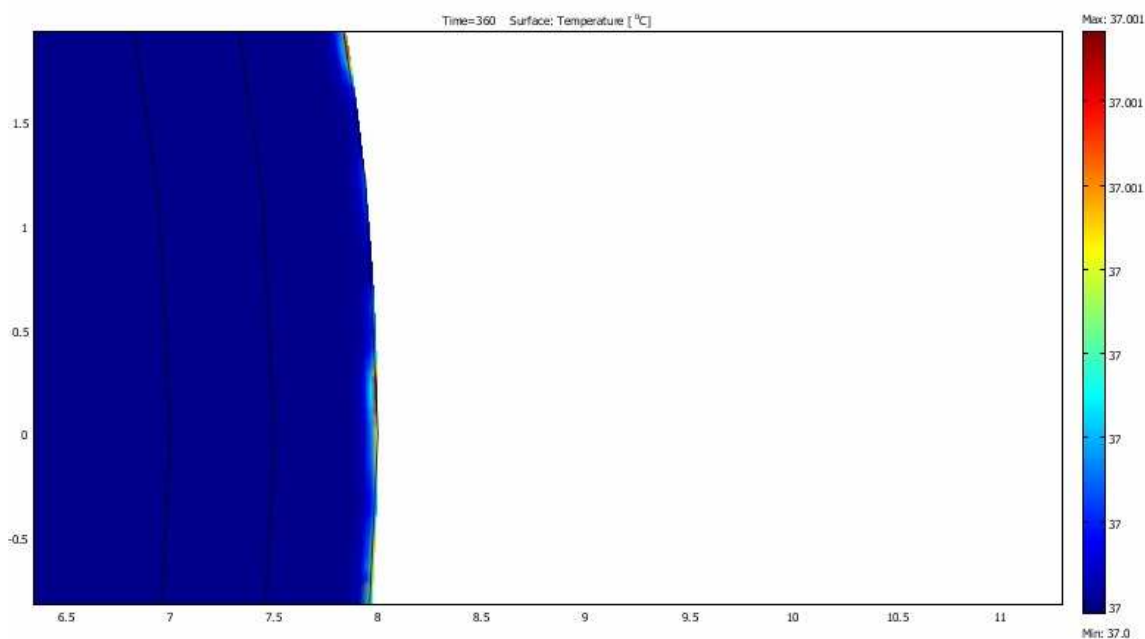
Zároveň je třeba podotknout, že čím dále od hlavy se anténa mobilního telefonu nachází, tak s tím větším počtem vygenerovaných bodů se program potýká. Pro vzdálenost 1 cm byla vygenerována maximálně hustá síť bodů, kterou daná počítačová sestava zvládala. Toto řešení je náročné především na operační paměť, přičemž použité PC disponovalo pamětí o velikosti 1,50 GB RAM. Tudíž pro vzdálenost 10 cm, jejíž oblast je zvětšena o tento rozdíl devíti centimetrů dochází při řešení k nepřesnostem, které jsou dány snížením hustoty vygenerované sítě bodů. K největším nepřesnostem tedy dochází pro největší vzdálenost 50 cm, která odpovídá telefonnímu hovoru při použití handsfree.

Teplotní změny tkáně:



Obrázek 5.6.3: Teplotní změny tkáně - vzdálenost 1 cm.

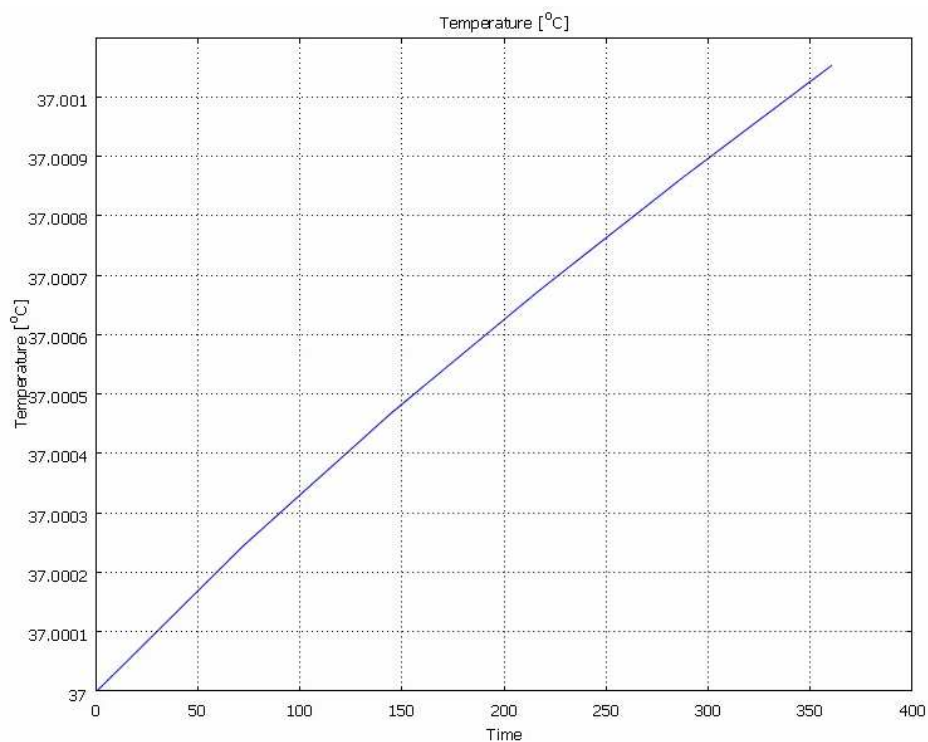
V případě, kdy se anténa nachází ve vzdálenosti 1 cm od hlavy, můžeme zaznamenat, že se teplota mění v závislosti na časovém intervalu šesti minut v ohnisku maximálně o tisícinu stupně Celsia.



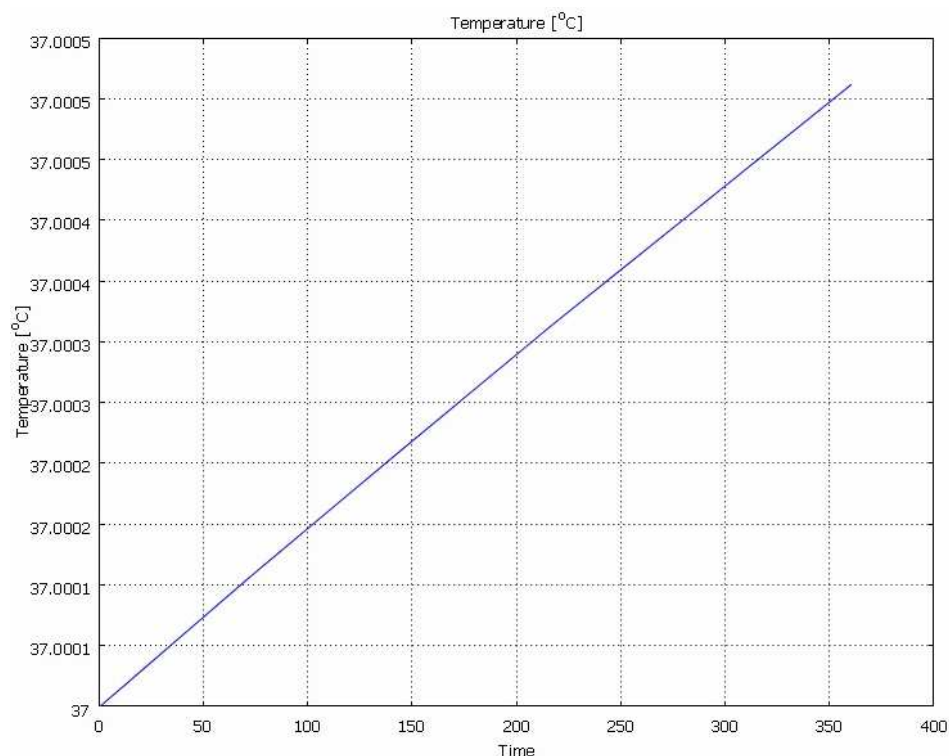
Obrázek 5.6.4: Teplotní změny tkáně - vzdálenost 10 cm.

Pro vzdálenost 10 cm se teplota mění v působišti s nejvyšší teplotní aktivitou maximálně o pět desetitisícin stupně, což je znatelně méně než v předchozím případě.

Teplotně časová závislost pro bod s největšími změnami:



Obrázek 5.6.5: Závislost teploty na čase - vzdálenost 1 cm.



Obrázek 5.6.6: Závislost teploty na čase - vzdálenost 10 cm.

Zde můžeme vidět vývoj velikosti teploty pro vzdálenost 1 i 10 cm po dobu šesti minut. Tyto závislosti byly vyneseny pro body, v nichž dochází k nejmarkantnějším teplotním změnám. V obou případech se jedná o závislosti téměř lineární.

5.7 Výpočet hodnoty SAR

Prostředí RF modulu nám umožňuje zobrazení rozložení intenzity elektrického pole. Pro určení hodnoty SAR nám tedy stačí nalézt nejvyšší hodnotu intenzity elektrického pole a to jednak v rámci tkáně reprezentující pokožku a svalovinu, dále pro lebku a také pro vrstvu vnitřních orgánů a tekutiny. Velikost SAR poté získáme dosazením hodnot hustoty a konduktivity jednotlivých tkání a to dosazením do vzorce:

$$SAR = \frac{\sigma E_i^2}{\rho} \quad (3.3.2)$$

Hodnota SAR pro vzdálenost 1 cm:

$$SAR_{kuzesvalovina-1cm} = \frac{0.9056(6.8755^2)}{1025} = 0.0418 \text{ W/kg}$$

$$SAR_{lebka-1cm} = \frac{0.3406((6.4791 \cdot 10^{-4})^2)}{1810} = 7.8994 \cdot 10^{-11} \text{ W/kg}$$

$$SAR_{vnitrniorgany-1cm} = \frac{0.9434((5.7412 \cdot 10^{-7})^2)}{1030} = 3.019 \cdot 10^{-16} \text{ W/kg}$$

Hodnota SAR pro vzdálenost 5 cm:

$$SAR_{kuzesvalovina-5cm} = \frac{0.9056(5.9029^2)}{1025} = 0.0308 \text{ W/kg}$$

$$SAR_{lebka-5cm} = \frac{0.3406((3.9806 \cdot 10^{-4})^2)}{1810} = 2.9817 \cdot 10^{-11} \text{ W/kg}$$

$$SAR_{vnitrniorgany-5cm} = \frac{0.9434((4.9911 \cdot 10^{-7})^2)}{1030} = 2.2817 \cdot 10^{-16} \text{ W/kg}$$

Hodnota SAR pro vzdálenost 10 cm:

$$SAR_{kuzesvalovina-10cm} = \frac{0.9056(2.8823^2)}{1025} = 0.0073 \text{ W/kg}$$

$$SAR_{lebka-10cm} = \frac{0.3406((3.7389 \cdot 10^{-4})^2)}{1810} = 2.6306 \cdot 10^{-11} \text{ W/kg}$$

$$SAR_{vnitrniorgany-10cm} = \frac{0.9434((4.3540 \cdot 10^{-7})^2)}{1030} = 1.7363 \cdot 10^{-16} \text{ W/kg}$$

Hodnota SAR pro vzdálenost 50 cm:

$$SAR_{kuzesvalovina-50cm} = \frac{0.9056(0.8499^2)}{1025} = 6.3819 \cdot 10^{-4} \text{ W/kg}$$

$$SAR_{lebka-50cm} = \frac{0.3406(((2.7734 \cdot 10^{-4})^2)^2)}{1810} = 1.4474 \cdot 10^{-11} \text{ W/kg}$$

$$SAR_{vnitrniorgany-50cm} = \frac{0.9434((3.8717 \cdot 10^{-7})^2)}{1030} = 1.3729 \cdot 10^{-16} \text{ W/kg}$$

Výpočet hodnot SAR jsme provedli vždy pro všechny vrstvy tkání zejména pro vzdálenost 1cm, což odpovídá vzdálenosti při telefonním hovoru. Dále pak pro vzdálenost 50cm, která představuje vzdálenost při použití telefonu s handsfree sadou. Pro ilustraci jsme provedli také výpočet pro vzdálenosti 5 a 10cm. Hodnota konduktivity i hustoty prostředí jsou pro nás konstantní. Stačí nám tedy pro každou vzdálenost zjistit pomocí RF modulu velikost intenzity elektrického pole v dané tkáni a následně vypočítat velikost SAR. Tento výpočet jsme provedli pro čtyři vzdálenosti.

Můžeme konstatovat, že čím blíže hlavy se anténa nachází, tím vyšší hodnotu SAR získáme. Tudiž, čím více se s anténou vzdalujeme, tím nižší hodnoty SAR získáváme. Co se týče velikosti SAR, tak můžeme konstatovat, že v žádném z případů nebyla překročena nejvyšší přípustná hodnota 0,08 W/kg stanovená nařízením vlády č. 480/2000 Sb. o ochraně před neionizujícím zářením.

6. Závěr

V této práci jsme měli možnost seznámit se se základními poznatky z oblasti teorie elektromagnetického pole. Na základě Maxwellových rovnic jsme byli schopni určit jejich řešení, tedy zobecněné vlnové rovnice. Díky těmto nám bylo umožněno prostudovat chování rovinných harmonických vln v dielektriku, jejich disperzi, odraz a lom vlnění na rozhraní. Stejně tak i mezi dvěma dielektriky. Nedílnou součástí této oblasti byla také studie pole elektrického a magnetického dipólu.

Dále jsme prostudovali hygienickou normu - Nařízení vlády č. 480/2000 Sb. o ochraně před neionizujícím zářením, v níž jsme zjistili nejvyšší přípustné hodnoty SAR, které jsme použili v modelovém prostředí, stejně jako příslušné vztahy pro výpočet konkrétních hodnot SAR. Řekli jsme si také, jaký dopad má neionizující záření na lidský organismus.

Pro modelové prostředí jsme taktéž potřebovali znát základní parametry antén mobilů. Jednalo se zejména o pracovní frekvence, intenzitu elektrického pole, výkon, nebo rozměry apertur. Touto tematikou se zabývala kapitola následující. V první části jsme si vyjmenovali a popsali charakteristiky antén externích. Tento typ apertury byl také použit v modelu pro semestrální projekt. Tyto typy antén jsou již v dnešní době nahrazovány progresivnější mikropáskovou technologií. Existuje šest typů těchto planárních antén, jejichž konstrukční řešení a parametry jsme si uvedli vzápětí. Pro modelové řešení jsem zvolil konstrukci PIFA, která je nejvíce používanou interní anténou v komerčních aplikacích pro mobilní komunikaci. Hlavní důvod je ten, že její rozměry jsou miniaturní, což ji dělá vhodnou pro montáž do mobilních zařízení. Pro jednotlivé typy antén jsme si také uvedli vyzařovací diagramy.

Pro konkrétní modelové řešení bylo zapotřebí vybrat vhodné modelové prostředí. Tímto je v našem případě program Comsol Multiphysics v3.4. Za účelem získání měsíční zkušební verze tohoto produktu bylo třeba kontaktovat emailem firmu COMSOL, Inc. s pobočkou v Kanadě. Na základě této žádosti bylo zasláno DVD s programem Comsol Multiphysics v3.4a a to distribuční firmou pro Českou republiku, HUMUSOFT s.r.o.

Naši úlohu jsme řešili v RF modulu, jehož základní charakteristika je obsažena v kapitole páté. Konkrétní zpracování se sestávalo z následujících fází: Nejprve jsme namodelovali jednotlivé objekty. Těmto jsme přiřadili příslušné parametry. Model jsme vyřešili nejprve z hlediska elektromagnetické interakce antény s modelem hlavy. Na základě těchto výsledků jsme následně vyřešili teplotní změny v tkáních v závislosti na čase. Všechny výsledky jsme patřičně zdokumentovali a okomentovali. Finálním krokem byl výpočet hodnot SAR pro různé vzdálenosti antény od modelu lidské hlavy. Tyto hodnoty jsme nakonec porovnali s nejvyšší přípustnou hodnotou SAR dle nařízení vlády č. 480/2000 Sb. o ochraně před neionizujícím zářením, abychom zaručili, že nebyla překročena.

Výsledky řešení jsou doloženy graficky a to prostřednictvím **Obrázků 5.6.1 - 5.6.6**, které odpovídají vzdálenostem 1 cm (vzdálenost při klasickém telefonním hovoru) a 10 cm. Pro výpočet hodnoty měrného absorbovaného výkonu byly opět využity tyto dvě vzdálenosti a také vzdálenosti 5 cm a 50 cm (tato poslední odpovídající telefonnímu hovoru za použití handsfree sady). Pro řešení jednotlivých případů bylo nutné vygenerovat síť bodů. Pro vzdálenost 1 cm byl vygenerován maximální počet bodů, který daná operační paměť použité počítačové sestavy zvládla řešit. Pro tyto body byly následně řešeny velikosti hodnot rozložení elektrického pole. Obecně lze říci, že čím dále od hlavy se mobilní aparát nacházel, tím více bodů model obsahoval. Tím se tedy snižovala hustota rozložení vygenerovaných bodů a pro největší vzdálenost 50 cm jsme tedy logicky dostali výsledky nejméně přesné.

Z těchto výsledků jsme vyvodili patřičné důsledky a vlivy elektromagnetického vlnění na biologickou tkáň.

7. Literatura

- [1] L. HAŇKA: *Teorie elektromagnetického pole*, SNTL, Praha 1975
- [2] J. ROZMAN, M. CHMELAŘ, K. JEHLIČKA: *Terapeutická a protetická technika*, Skripta VUT, Brno 2004
- [3] V. VRÁNA: *Modelování biologických objektů*, Ediční středisko VUT Brno, Brno 1989
- [4] Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením č.480/2000 Sb.
- [5] Z. PŠENÁKOVÁ, V. PŠENÁK: *Electromagnetic Heating of Human Tissue*. Dostupné z: <<http://caca.xicht.net/down.php?id=2914>>, 2004
- [6] *Comsol Multiphysics v3.4a - user manual*. Dostupné z: <<http://www.comsol.com/>>.
- [7] *Elektromagnetická kompatibility* [online]. 2007, poslední revize 20.11. 2007. Dostupné z: <www.elsmog.cz/emc_kardioestimul.doc>.
- [8] *Reconfigurable Antenna* [online]. 2007, poslední revize 22.11.2007. Dostupné z: <<https://www.sdrforum.org/pages/sdr05/5.4%20Reconfigurable%20Antenna/5.4-01%20Yun%20et%20al.pdf>>.
- [9] *Mobile Phone Antenna Parameters* [online]. 2007, poslední revize 24.11.2007. Dostupné z: <www.eurasip.org/Proceedings/Ext/ISCCSP2006/defevent/papers/cr1223.pdf>.
- [10] *Elektrina a magnetismus* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/elmg/exkurze_rad.html>.
- [11] *Radiation Patterns* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://www.kyes.com/antenna/navy/rpatterns/radiapat.htm>>.
- [12] *Antenna Types* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://www.pacificaerials.co.nz/antInfo/antennaTypes.htm>>.
- [13] POKORNÝ, M. *Vícepásmové planární antény*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Dostupné z: <www.ieee.cz/mtt/soutez07/Pokorny.pdf>, 2006.
- [14] KHALATBARI, S., SARDARI D., MIRARZAEI, A. A., and SADAFI, H. A. *Calculating SAR in Two Models of the Human Head Exposed to Mobile Phones Radiations at 900 and 1800MHz* [online]. 2006, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://piers.mit.edu/piersonline/download.php?file=MDUwOTA1MTkwNjUzfFZvbDJObzFQYWdlMTA0dG8xMDkucGRm>>.
- [15] *Microwave Materials* [online]. 1998, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <www.arlon-med.com/AR320.pdf>.
- [16] *Thermal Properties for PCBs* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <http://www.frigprim.com/online/cond_pcb.html>.
- [17] *Thermal Conductivity Science* [online]. 2008, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://www.hukseflux.com/thermal%20conductivity/thermal.htm>>.
- [18] *Fyzikální vlastnosti technických plastů* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://www.tribon.cz/plasty/-tivar.htm>>.
- [19] EBRAHIMI-GANJEH, M. A. *Interaction Of Dual Band Helical And PIFA Handset Antennas With Human Head And Hand* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://ceta.mit.edu/pier/pier77/18.07081804.Ebrahimi.A.pdf>>.

8. Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 2.6.1 - Odraz a lom vlnění - Vektor \vec{E}_0 kolmý k rovině dopadu.....	17
Obrázek 2.6.2 - Odraz a lom vlnění - Vektor \vec{E}_0 rovnoběžný s rovinou dopadu.....	18
Obrázek 3.3.1 - Referenční úrovně - Elektrické pole E a magnetická indukce B	22
Obrázek 3.3.2 - Oteplení tkání v závislosti na expozici.....	23
Obrázek 3.3.3 - Frekvenční závislost absorbovaného výkonu.....	24
Obrázek 4.1.1 - Antény mobilních telefonů: a) Čtvrtvlnný monopól, b) Šroubovice.....	25
Obrázek 4.2.1 - Vyzařovací diagram čtvrtvlnné antény.....	25
Obrázek 4.2.2 - Vyzařovací diagram spirálovité antény.....	26
Obrázek 4.3.1 - Planární fličková anténa napájena: a) mikropáskovým vedením, b) koaxiální sondou.....	27
Obrázek 4.3.2 - Vyzařovací diagramy pro $f = 1,227\text{GHz}$	27
Obrázek 4.3.3 - Prostorové uspořádání konstrukce PIFA.....	28
Obrázek 4.3.4 - Prostorové uspořádání konstrukce PIFA se skládaným fličkem.....	28
Obrázek 4.3.5 - Vyzařovací diagramy pro frekvenci $f = 920\text{Hz}$	29
Obrázek 4.3.6 - Dvoupásmové nízkoprofilové planární monopóly: a) se zářezy, b) spirální.....	29
Obrázek 4.3.7 - Vyzařovací diagramy pro frekvenci $f = 900\text{MHz}$	30
Obrázek 4.3.8 - Dvoupásmová štěrbinová anténa.....	30
Obrázek 4.3.9 - Postup tvorby: a) Kochovy křivky, b) Sierpinského monopólu.....	31
Obrázek 4.3.10 - Vyzařovací diagramy pro frekvence $f = 360\text{MHz}$, 980MHz a 1440MHz	32
Obrázek 4.4.1 - Chipová anténa - ukázka rozměrů.....	33
Obrázek 4.4.2 - Příčný řez strukturou substrátů.....	33
Obrázek 4.4.3 - Rozměry antény PIFA.....	34
Obrázek 5.2.1 - Oblasti aplikací RF Modulu.....	36
Obrázek 5.3.1 - RF Modul - základní parametry.....	37
Obrázek 5.4.1 - 2D model lidské hlavy.....	38
Obrázek 5.4.2 - 2D model mobilního telefonu a detail antény.....	39
Obrázek 5.6.1 - Hodnota elektrického pole - vzdálenost 1 cm.....	41
Obrázek 5.6.2 - Hodnota elektrického pole - vzdálenost 10 cm.....	41
Obrázek 5.6.3 - Teplotní změny tkáně - vzdálenost 1 cm.....	42
Obrázek 5.6.4 - Teplotní změny tkáně - vzdálenost 10 cm.....	43
Obrázek 5.6.5 - Závislost teploty na čase - vzdálenost 1 cm.....	43
Obrázek 5.6.6 - Závislost teploty na čase - vzdálenost 10 cm.....	44
Tabulka č. 1 - Nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu a energie.....	21
Tabulka č. 2 - Přidělená kmitočtová pásma pro komunikační systémy.....	32
Tabulka č. 3 - Výpočet intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu.....	32
Tabulka č. 4 - Parametry tkání pro simulaci (pro frekvenci 902.5 MHz).....	39
Tabulka č. 5 - Parametry mobilního telefonu.....	40

9. Seznam použitých zkratk a symbolů

PIFA	- Planar Inverted-F Antenna, Planární anténa obrácené F
ϵ_r	- relativní permitivita
GSM	- Global System for Mobile Communications
SAR	- Specific Absorption Rate, Měrný absorbovaný výkon
J_0	- Hustota elektrického proudu
ρ_0	- Hustota elektrického náboje
E	- Intenzita elektrického pole
B	- Magnetická indukce
D	- Elektrická indukce
H	- Intenzita magnetického pole
$\sum I$	- Celkový kondukční nebo konvekční proud volných nábojů
$\sum Q$	- Celkový volný náboj obsažený v objemu obaleném plochou S
ψ	- Tok intenzity elektrického pole
Φ	- Magnetický (indukční) tok
ϵ	- Permitivita
μ	- Permeabilita
γ	- Konduktivita
k	- Konstanta šíření
Z	- Charakteristická impedance
β	- Měrný útlum
α	- Fázová konstanta
ω	- Úhlová rychlost
v_f	- Fázové rychlost
c	- Rychlost světla
ϑ_0	- Úhel dopadu
ϑ_1	- Úhel odrazu
ϑ_2	- Úhel lomu
E_i	- Intenzita elektrického pole uvnitř tělesné tkáně
σ	- Elektrická vodivost tkáně těla
c_i	- Měrná tepelná kapacita tělesné tkáně
J	- Indukovaná proudová hustota v tělesné tkáni
SA	- Měrná absorbovaná energie
P_{in}	- Výkon antény
E_0	- Intenzita elektrického pole antény
nu_{c0}	- Cutoff frekvence antény
c_s	- Specifické oteplení
k	- Tepelná vodivost
ρ	- Hustota

10. Obsah přiloženého CD

- BakalářskáPráce.doc
- BakalářskáPráce.pdf
- Popisný soubor.pdf

Comsol Multiphysics 3.4a

Řešení - vzdálenost 1cm

- Intenzita elektrického pole 1cm.jpg
- Model pro vzdálenost 1cm.mph
- Teplotní změny 1cm.jpg
- Výpočet SAR - 1cm.txt
- Závislost teploty na čase 1cm.jpg

Řešení - vzdálenost 5cm

- Výpočet SAR - 5cm.txt
- Model pro vzdálenost 5cm.mph

Řešení - vzdálenost 10cm

- Intenzita elektrického pole 10cm.jpg
- Model pro vzdálenost 10cm.mph
- Teplotní změny 10cm.jpg
- Výpočet SAR - 10cm.txt
- Závislost teploty na čase 10cm.jpg

Řešení - vzdálenost 50cm

- Výpočet SAR - 50cm.txt
- Model pro vzdálenost 50cm.mph